

Rapport de Projet de Fin d'Études

**Étude comparée entre Eurocodes et normes canadiennes
appliquée à la conception d'un pont levant en structure
métallique et infrastructures béton.**



Auteur : Mlle Carole Finiels

Élève ingénieur 5e année, INSA de Strasbourg, spécialité
Génie civil, option Construction

Tuteur entreprise : M Tony Mailhot

Directeur conception ponts et ouvrages d'art, GENIVAR Inc.

Tuteur INSA Strasbourg : M Claude Schaeffer

Professeur à l'INSA de Strasbourg



Année 2010/2011 Période du PFE : du 14 mars au 29 juillet 2011



Remerciements

La réalisation de ce projet a été pour moi une expérience enrichissante et bénéfique. Je tiens à remercier tout le personnel de la société GENIVAR. La disponibilité et l'ouverture de chacun ont facilité mon intégration et la réalisation de mon étude. Je souhaite remercier plus particulièrement :

-  M. Daniel Filion directeur de la division Transport, GENIVAR Montérégie, de m'avoir accueilli au sein de son département;
-  M. Tony Mailhot directeur Ouvrage d'Art, GENIVAR Longueuil, de m'avoir permis d'intégrer son équipe et de travailler sur le pont 9 et pour sa confiance quant à la réalisation de mon projet;
-  M. Claude Schaeffer, professeur à l'INSA de Strasbourg, pour son suivi et ses conseils pendant le déroulement de l'étude;
-  L'ensemble des salariés des équipes Ouvrage d'Art et Voirie, GENIVAR Longueuil, pour leurs aides techniques et méthodologiques et leur disponibilité tout au long de mon projet.

Résumé

Le mémoire porte sur une étude comparative entre le dimensionnement d'un pont levant en structure métallique et infrastructure béton suivant les normes applicables en Europe, les Eurocodes et les normes canadiennes, CAN/CSA S6-06. L'étude consiste en la comparaison des différentes approches entre les deux normes. Pour le dimensionnement aux Eurocodes, les hypothèses de chargement de l'ouvrage sont déterminées suivant l'EC1-2 « Actions sur les ponts, dues au trafic ». La modélisation de l'ouvrage sous le logiciel de calcul « Robot Structural Analysis » permet d'obtenir les différentes sollicitations. Enfin, le dimensionnement de la structure se fait suivant l'approche de l'EC2-1-1 « Calcul des structures en béton » et l'EC3-3 « Ponts en structure métallique ». Pour le dimensionnement suivant le CAN/CSA S6-06, les hypothèses de chargement de l'ouvrage sont déterminées suivant le chapitre 3 « Charges ». La modélisation de l'ouvrage sous le logiciel de calcul « Advance Design America » permet d'obtenir les différentes sollicitations. Enfin, le dimensionnement de la structure se fait suivant l'approche du chapitre 8 « Ouvrage en béton » et du chapitre 10 « Ouvrage en acier ». L'étude comparative mène à une synthèse permettant de déterminer l'impact d'un système normatif sur le dimensionnement d'une structure et son enveloppe budgétaire.

Mots clés : Pont levant, Structure métallique, Eurocodes, CAN/CSA S6-06, Etude comparative

Abstract

The object of my study is about a comparative study between the sizing up of a lifting bridge made of steel reference to Eurocode books and the sizing up reference to the CAN/CSA s6-06. The study aims to highlight the differences between the Canadian specifications and the European specification. To size up the bridge under the Eurocode books, the established load of the structure follows EC1-2 "Actions on structures – Traffic loads on bridges". The different stresses are defined by the computation program "Robot Structural Analysis" in order to draw up the model. Then the sizing up of the structure is made under the EC2-1-1 "Design of concrete structures – general rules and rules for buildings" and EC3-3 "Design of steel bridges". To size up the bridge under Canadian standards, the sizing, the established load of the structure follows the Chapter 3 "Load". Stresses are obtained with the computation program "Advance Design America". Then, the sizing up of the structure is made under Chapter 8 and Chapter 10. The comparative study gives an analysis to determine the impact of a standard system on the sizing and the global cost of a project.

Key words: Lift Bridge, Steel construction, Eurocodes, CAN/CSA S6-06, Comparative study.

Sommaire

INTRODUCTION	9
PARTIE I –PRESENTATION GENERALE	10
1. CONTEXTE ET ENJEUX DU SUJET	12
2. L'ENTREPRISE GENIVAR	13
3. ETUDE D'UN PONT LEVANT EN STRUCTURE METALLIQUE ET INFRASTRUCTURES BETON	15
4. DEMARCHE SUIVIE.....	31
5. SCHEMA EURISTIQUE.....	39
PARTIE II – DIFFERENCES NOTABLES ENTRE LES REGLEMENTS.....	42
1. HYPOTHESES DE CALCULS	44
2. JUSTIFICATION D'UNE SECTION	48
3. ANALYSE SISMIQUE	53
PARTIE III – SYNTHESE DES RESULTATS	55
1. HYPOTHESES DE CALCULS	57
2. LES ETATS LIMITES	60
3. LES COMBINAISONS DE CHARGES	60
4. METHODE DE DIMENSIONNEMENT	61
5. VARIATION DE LA RESISTANCE PONDEREE SUIVANT LA NORME UTILISEE	62
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	63
BIBLIOGRAPHIE.....	64
TABLE DES FIGURES.....	66
TABLE DES TABLEAUX.....	67
TABLES DES ANNEXES.....	67

Sommaire – Partie I

PARTIE I – PRESENTATION GÉNÉRALE

1. CONTEXTE ET ENJEUX DU SUJET	12
1.1. PRESENTATION DU SUJET	12
1.2. OBJECTIFS	12
2. L'ENTREPRISE GENIVAR	13
2.1. UNE ENTREPRISE QUEBECOISE D'ENVERGURE INTERNATIONALE	13
2.2. LE BUREAU OUVRAGE D'ART DE LONGUEUIL, QUEBEC, CANADA	14
3. ETUDE D'UN PONT LEVANT EN STRUCTURE METALLIQUE ET INFRASTRUCTURES BETON	15
3.1. CONTEXTE GENERAL	15
3.1.1. Situation géographique.....	15
3.1.2. L'ancien Pont n° 9.....	16
3.1.3. Justification de la reconstruction	17
3.2. LE NOUVEAU PONT N°9	18
3.2.1. Des contraintes à respecter des solutions adaptées	18
3.2.2. Description de l'ouvrage.....	19
3.2.3. Exécution des travaux	25
3.2.4. Situation actuelle	29
3.3. ORGANIGRAMME DU PROJET.....	29
4. DEMARCHE SUIVIE.....	31
4.1. ORGANISATION DE MON TRAVAIL	31
4.2. PRESENTATION DES NORMES UTILISEES.....	32
4.2.1. Normes canadiennes.....	32
4.2.2. Normes européennes	33
4.2.3. Concordance entre les normes	34
4.3. PRESENTATION DES LOGICIELS UTILISES.....	34
4.3.1. Logiciels de modélisations.....	34
4.4. PRESENTATION DES TACHES A REALISER	35
4.5. PLANNING DE MON TRAVAIL.....	37
5. SCHEMA EURISTIQUE.....	39

Sommaire – Partie II

PARTIE II – DIFFERENCES NOTABLES ENTRE LES REGLEMENTS

1.	HYPOTHESES DE CALCULS	44
1.1.	MATERIAUX.....	44
1.2.	CHARGES PERMANENTES	44
1.3.	CHARGES DE TRAFIC ROUTIER	45
1.3.1.	<i>Nombre de voies.....</i>	45
1.3.2.	<i>Modèle de charge</i>	45
1.3.3.	<i>Coefficient de majoration dynamique.....</i>	47
1.4.	FORCES DE FREINAGES	47
1.5.	ACTION SUR LES TROTTOIRS	48
1.6.	ACTION THERMIQUE	48
1.6.1.	<i>Coefficient de dilatation thermique</i>	48
1.6.2.	<i>Composante uniforme et gradient thermique.....</i>	48
2.	JUSTIFICATION D'UNE SECTION	48
2.1.	DEMARCHE DE JUSTIFICATION D'UNE SECTION SELON EUROCODE 3.....	49
2.1.1.	<i>Justification en flexion.....</i>	49
2.1.2.	<i>Justification à l'effort tranchant.....</i>	49
2.1.3.	<i>Résistance au voilement sous cisaillement</i>	50
2.1.4.	<i>Interaction flexion et effort tranchant</i>	50
2.1.5.	<i>Vérification de la rigidité des raidisseurs</i>	51
2.1.6.	<i>Vérification au déversement</i>	51
2.2.	DEMARCHE DE JUSTIFICATION D'UNE SECTION SELON CAN/CSA S6-06	51
2.2.1.	<i>Etat limite ultime.....</i>	51
2.2.2.	<i>Vérification des contraintes ELF.....</i>	51
2.2.3.	<i>Vérification de la flèche à l' ELUT.....</i>	53
3.	ANALYSE SISMIQUE	53
3.1.	CATEGORIE D'IMPORTANCE.....	53
3.2.	PONT A TRAVÉE SIMPLE	53

Sommaire – Partie III

PARTIE III – SYNTHÈSE DES RESULTATS

1.	HYPOTHESES DE CALCULS	57
1.1.	ACIER	57
1.2.	CHARGES PERMANENTES	57
1.3.	ACTIONS DU TRAFIC ROUTIER.....	57
2.	LES ETATS LIMITES	60
3.	LES COMBINAISONS DE CHARGES.....	60
4.	METHODE DE DIMENSIONNEMENT	61
5.	VARIATION DE LA RESISTANCE PONDEREE SUIVANT LA NORME UTILISEE	62
6.	INFLUENCE DE LA NORME SUR LE COUT DE L'OUVRAGE.....	62

Introduction

La formation d'ingénieurs Génie Civil de l'INSA Strasbourg se conclut par un Projet de Fin d'Études. Pendant 20 semaines, l'élève ingénieur fournit un travail personnel sur un sujet unique et professionnel. Mon attrait pour les Ouvrages d'Art et mon souhait de devenir ingénieur d'Études dans une firme internationale m'ont conduit à effectuer mon Projet de Fin d'Études au sein du département Ouvrage d'Art du groupe de Génie Conseil québécois, GENIVAR.

GENIVAR a été fondée en 1959 à Québec. Son chiffre d'affaires est de 250 millions de dollars canadiens. Il s'agit du 9e plus important employeur d'ingénieurs du Québec, avec au-delà de 3 500 employés œuvrant dans les secteurs du transport, des infrastructures urbaines, du bâtiment, de l'environnement et du développement durable. La stratégie économique de GENIVAR est d'acquérir des entreprises spécialisées afin de couvrir le plus grand champ de compétences possible et pouvoir répondre à toute offre. Ainsi, déjà fortement présente au Canada et dans les Caraïbes, GENIVAR souhaite poursuivre ses acquisitions et s'étendre en Europe.

Une des principales volontés de la société est de devenir un leader mondial dans le Génie Conseil. S'agrandir en Europe est donc une priorité. Ainsi, GENIVAR pourra, en connaissant les différences majeures entre les règlements et l'impact des normes sur le coût et le dimensionnement, s'adapter et rester compétitive, quel que soit le continent.

Le but de ce mémoire est d'effectuer un comparatif des normes canadiennes et Européennes appliqués à la conception d'un pont levant en structure métallique et infrastructure béton. L'objectif est de tirer de cette comparaison l'influence d'un système normatif sur le dimensionnement et le coût de l'ouvrage.

Suite à l'ouverture du bureau GENIVAR France et la volonté de l'entreprise de créer une division Ouvrage d'Art, ce mémoire sera mis à la disposition des employés québécois souhaitant travailler dans cette division et connaître les différences notables entre les deux règlements.

Ce projet a aussi pour objectif d'apporter aux employés de GENIVAR le savoir quand à l'influence des Eurocodes sur le coût des structures réalisées en Europe.

Au Canada, la conception d'un ouvrage d'art doit tenir compte des exigences de la norme CAN CSA S6-06 du code canadien sur le calcul des ponts routiers. Outre le code fédéral, les réglementations provinciales sont bien sûr en vigueur. Ainsi, au Québec les exigences du Tome III – Ouvrages d'art des normes du Ministère des Transports du Québec (MTQ) et les indications présentes dans le Manuel de conception des structures Volume I doivent aussi être prises en considération. En Europe, les Eurocodes sont en vigueur. Ils sont divisés en 10 groupes de textes et traitent des aspects techniques du calcul de structures et du calcul au feu des bâtiments et ouvrages de génie civil.

L'objet de l'étude comparative est un pont levant, enjambant le canal de Chambly dans la province de Québec, construit pour le compte de Parcs Canada. Cette structure remplacera le Pont no 9, voie de transport rotative desservant les populations des îles Sainte-Marie et Sainte-Thérèse. Les plans et devis sont terminés et les travaux sont en cours d'exécution. Diverses alternatives furent analysées quant au choix de la structure, dont la reconstruction d'un pont rotatif semblable à celui déjà existant. Toutefois, les quelques quinze mètres séparant le canal de Chambly de la route 223 rendaient cette solution difficilement réalisable. L'équipe de GENIVAR a retenu la construction d'un pont levant, avec contrepoids muni d'un système hydraulique de levage. Bien que d'envergure modeste cette structure représente, par son système de levage, une première en Amérique du Nord. À ce jour, sur ce continent, ce type de construction est uniquement réalisé sur le principe du pont tournant.

Partie 1

Présentation générale

Cette partie présente :

- Le sujet du mémoire, ses enjeux et objectifs ;
- La structure d'accueil, l'entreprise GENIVAR et le bureau Ouvrage d'Art de Longueuil, Québec ;
- L'ouvrage faisant l'objet de l'étude comparative, les raisons de sa construction, ses caractéristiques techniques et son état actuel ;
- La démarche suivie pour mener l'étude comparative des systèmes normatifs canadiens et européens.

La présente partie est structurée comme suit :

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET ENJEUX DU SUJET	12
1.1. PRESENTATION DU SUJET	12
1.2. OBJECTIFS	12
2. L'ENTREPRISE GENIVAR	13
2.1. UNE ENTREPRISE QUEBECOISE D'ENVERGURE INTERNATIONALE	13
2.2. LE BUREAU OUVRAGE D'ART DE LONGUEUIL, QUEBEC, CANADA	14
3. ETUDE D'UN PONT LEVANT EN STRUCTURE METALLIQUE ET INFRASTRUCTURES BETON	15
3.1. CONTEXTE GENERAL	15
3.1.1. <i>Situation géographique</i>	15
3.1.2. <i>L'ancien Pont n° 9</i>	16
3.1.3. <i>Justification de la reconstruction</i>	17
3.2. LE NOUVEAU PONT N°9	18
3.2.1. <i>Des contraintes à respecter des solutions adaptées</i>	18
3.2.2. <i>Description de l'ouvrage</i>	19
3.2.3. <i>Exécution des travaux</i>	25
3.2.4. <i>Situation actuelle</i>	29
3.3. ORGANIGRAMME DU PROJET	29
4. DEMARCHE SUIVIE	31
4.1. ORGANISATION DE MON TRAVAIL	31
4.2. PRESENTATION DES NORMES UTILISEES	32
4.2.1. <i>Normes canadiennes</i>	32
4.2.2. <i>Normes européennes</i>	33
4.2.3. <i>Concordance entre les normes</i>	34
4.3. PRESENTATION DES LOGICIELS UTILISES	34
4.3.1. <i>Logiciels de modélisations</i>	34
4.4. PRESENTATION DES TACHES A REALISER	35
4.5. PLANNING DE MON TRAVAIL	37
5. SCHEMA EURISTIQUE	39

1. Contexte et enjeux du sujet

1.1. Présentation du sujet

L'étude comparative porte sur un pont levant en structure métallique, selon les normes canadiennes (CAN/CSA S6-06, Tome III – Ouvrage d'art) et selon les Eurocodes afin de comparer les différentes approches de dimensionnement entre les normes canadiennes et européennes.

Ce mémoire présente une synthèse comparative établie suivant les points suivants :

- Comparer les hypothèses de calcul ;
- Comparer les sollicitations obtenues (RdM) ;
- Comparer les dimensionnements de la structure métallique ;

En outre, ce mémoire présente une analyse de l'impact normatif sur :

- Le dimensionnement de l'ouvrage ;
- L'enveloppe budgétaire.

1.2. Objectifs

GENIVAR est un groupe qui ne cesse de s'agrandir par ses nombreuses acquisitions au Québec, dans le reste du Canada, mais aussi à l'international. Une des principales volontés de la société est de devenir un leader mondial dans le génie-conseil. S'agrandir en Europe est alors une priorité. Ainsi, GENIVAR pourra, en connaissant les différences majeures entre les règlements et l'impact des normes sur le coût et le dimensionnement, s'adapter et rester compétitive, quel que soit le continent.

Suite à l'ouverture du bureau GENIVAR France et la volonté de l'entreprise de créer une division Ouvrage d'Art, ce mémoire sera mis à la disposition des employés québécois souhaitant travailler dans cette division et connaître les différences notables entre les deux règlements.

Le but de ce mémoire est d'effectuer un comparatif des normes canadiennes et Européennes appliqués à la conception d'un pont levant en structure métallique et infrastructure béton. L'objectif est de tirer de cette comparaison l'influence d'un système normatif sur le dimensionnement et le coût de l'ouvrage.

Ce projet a aussi pour objectif d'apporter aux employés de GENIVAR le savoir quand à l'influence des Eurocodes sur le coût des structures réalisées en Europe.

D'un point de vue personnel, le sujet est enrichissant. En effet, ayant effectué mon dernier semestre d'études à Sherbrooke, Québec, j'ai eu l'occasion de me familiariser avec les normes canadiennes. Effectuer une comparaison entre les deux normes me permettra de mieux comprendre les différences et similitudes et d'approfondir mes connaissances aux Eurocodes. De plus, il me permet d'effectuer le dimensionnement complet d'un ouvrage d'Art techniquement novateur en Amérique du Nord.

2. L'entreprise GENIVAR

2.1. Une entreprise québécoise d'envergure internationale

GENIVAR a été fondée en 1959 à Québec. Son chiffre d'affaires est de 250 millions de dollars canadiens. Il s'agit du **9^e plus important employeur d'ingénieur du Québec**, avec au-delà de 3 500 employés œuvrant dans les secteurs du transport, des infrastructures urbaines, du bâtiment, de l'environnement et du développement durable. En 2007, son président et chef de la direction est Pierre Shoiry.

L'entreprise possède une solide expertise en gestion et gérance de projets, en construction, en géotechnique, en financement ainsi qu'en exploitation d'infrastructures. Elle offre également des services de consulting dans le domaine du développement stratégique et organisationnel.

GENIVAR est issue de la fusion de plus de 25 firmes et exploite des activités dans plus de 85 bureaux au Canada, en Afrique et dans les Caraïbes. GENIVAR réalise des projets auprès des municipalités, des institutions, de plusieurs organismes provinciaux et fédéraux, des commerces et des industries du Canada ainsi que sur la scène internationale. Plusieurs de leurs réalisations ont été primées, tant au Canada qu'à l'international. Parmi les distinctions :

- ✚ Le prix Armatura 2010 par l'institut d'acier d'armature du Québec pour l'agrandissement du Palais des Congrès de Montréal, Québec.
- ✚ Le Grand prix du génie-conseil québécois 2009 par l'Association des ingénieurs-conseils du Québec pour la revitalisation du front de mer, Port-d'Espagne, Trinité-et-Tobago.
- ✚ Le Saskatchewan Masonry Design Award 2009 pour l'ingénierie de structure d'un bâtiment de l'Innovation Place, Saskatoon, Saskatchewan.



Partie 1 – Figure 2.1 — 1 Palais des Congrès de Montréal, Québec.



Partie 1 – Figure 2.1 — 2 Revitalisation du front de mer, Port-d'Espagne, Trinité-et-Tobago.



Partie 1 – Figure 2.1 — 3 Innovation Place, Saskatoon, Saskatchewan.

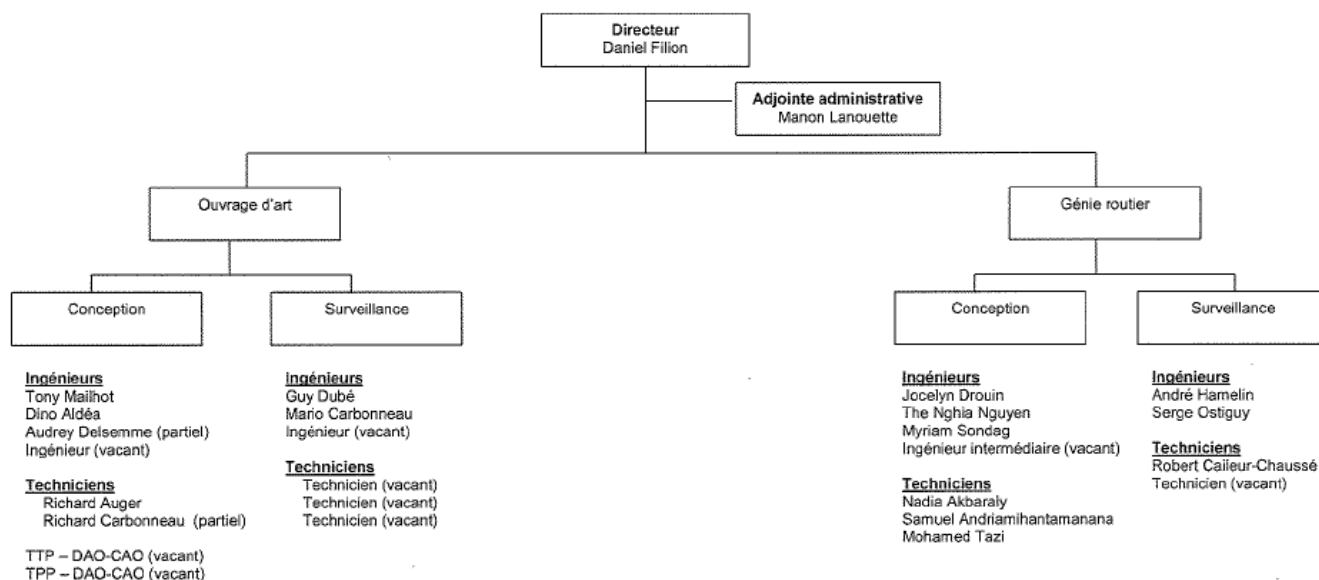
De plus, en octobre 2010 GENIVAR a reçu un prix pour sa **deuxième place en Amérique du Nord sur la liste des entreprises les plus performantes** publiée par The Zweig Letter. Cette liste fait un classement des firmes les plus performantes dans les domaines de l'architecture, du génie-conseil et de la consultation en environnement. Ces reconnaissances témoignent de la capacité de l'équipe à réaliser des ouvrages de qualité selon les règles de l'art en respectant les budgets et les échéanciers.

2.2. Le bureau Ouvrage d'Art de Longueuil, Québec, Canada

J'ai effectué mon Projet de Fin d'Études au sein du département Ouvrage d'Art du bureau de Longueuil dirigé par l'ingénieur M. Mailhot, qui fut mon tuteur de PFE. Ce département forme avec le département Génie Routier la division Transport de GENIVAR Longueuil, dirigé par M. Daniel Filion. De nombreux projets à l'image du pont 9, objet de mon étude, sont réalisés conjointement par les deux départements de la division.

Longueuil est située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, dans la banlieue sud de Montréal. C'est la cinquième ville en importance démographique au Québec. Elle fait partie de la région Montérégie. Le bureau GENIVAR Longueuil réalise des projets en Montérégie mais aussi dans les autres régions du Québec, région de Montréal, Estrie, Abitibi...

L'organigramme au sein de l'équipe est le suivant :



Partie 1 – Figure 2.2 — 4 Organigramme - Transport, Division Montérégie

Les professionnels de GENIVAR en ponts et ouvrages d'art possèdent une solide expertise pour la conception de nouvelles structures ou pour la réhabilitation de structures existantes incluant l'inspection et la surveillance de travaux. Leur expertise inclut tous les types d'ouvrages d'art, tant dans un environnement urbain et local que rural. Elle inclut les ponts à travée unique, les ponts à travées continues, les ponts surélevés, les ponts d'étagement, les échangeurs, les passages inférieurs, les ponts piétonniers conventionnels ou haubanés, les ponceaux, les murs de soutènement et antibruit ainsi que les structures de signalisation. Les matériaux de construction utilisés sont le métal, le béton, le béton précontraint par post et pré-tension, constructions mixte acier-béton et acier-bois.

Les services de GENIVAR incluent l'étude de faisabilité et de coûts, la conception, l'ingénierie détaillée, l'administration de contrat, la gestion de projet, la surveillance des travaux durant la construction, ainsi qu'à l'élaboration de programmes d'entretien.

La base de clientèle inclut des clients du secteur public et privé, les ministères provinciaux des Transports, les agences gouvernementales de transport et les municipalités. GENIVAR est en mesure de mobiliser son équipe multidisciplinaire dans le cadre de grands projets, notamment en consortium pour la réalisation de projets en PPP.

3. Etude d'un pont levant en structure métallique et infrastructures béton

3.1. Contexte général

3.1.1. Situation géographique

Le projet consiste à construire, pour le compte de Parcs Canada, un pont levant qui enjambe le canal de Chambly à la limite des municipalités de Carignan et de Saint-Jean-sur-Richelieu dans la province de Québec.



Partie 1 – Figure 3.1.1 — 5 Situation géographique générale

Cette structure sera édifée dans un nouvel axe routier et remplacera le Pont n° 9 — voie de transport rotative desservant les populations des îles Sainte-Marie et Sainte-Thérèse.



Partie 1 – Figure 3.1.1 — 6 Localisation du nouveau pont

Désigné lieu d'importance historique nationale en 1929 par le gouvernement du Canada, le canal demeure la seule composante opérationnelle du réseau des canaux historiques du Québec ayant conservé son gabarit d'antan. Depuis 1972, l'agence Parcs Canada veille à sa protection et à sa mise en valeur. La Société Canadienne de Génie Civil inscrit ce site dans sa courte **liste de 25 lieux historiques nationaux de génie civil**.

3.1.2. L'ancien Pont n° 9

Construit par la Montréal Bridge Works en 1887-1888, le Pont n° 9 **est le plus ancien de tous les ponts du canal de Chambly**. Erigé sur le canal de Lachine, il a été modifié et réimplanté sur le site actuel en 1923.

Les caractéristiques structurales et architecturales de ce pont tournant en font un élément à la fois représentatif et rare des constructions du XIXe siècle. Il est muni de fermes de type « Pony-Pratt », avec des montants carrés aux extrémités.



Partie 1 – Figure 3.1.2 — 7 Vue d'ensemble de l'ancien Pont 9 sur le canal de Chambly



Partie 1 – Figure 3.1.2 — 8 Vue de la voie carrossable du Pont 9 existant

Le canal de Chambly, situé le long du Richelieu, constitue un ensemble historique remarquable. La construction d'un nouveau pont et la conservation de l'ancien permettent à Parcs Canada d'insérer dans le paysage historique une réalisation moderne, véritable phare de la technologie contemporaine. Elle offre aux générations actuelles et futures un aperçu des réalisations techniques propres à notre époque, tout en conservant l'intégrité commémorative du lieu historique.

Considéré comme ressource culturelle par Parcs Canada, l'ancien Pont n° 9 sera retourné et stabilisé sur la terre ferme par de nouvelles fondations. Son tablier sera remplacé et son ossature repeinte.

3.1.3. Justification de la reconstruction

L'objectif premier du projet est de remplacer le pont n° 9 qui a atteint et dépassé sa durée de vie utile. Sa capacité a été diminuée de 25T à 5T et la circulation y est contrôlée et surveillée. De plus, il présente des signes de dégradation avancée et ne répond plus aux normes de sécurité en vigueur ni aux exigences de la circulation, tant pour l'accès des véhicules d'urgence, les types d'utilisation, le niveau de l'achalandage et le type de transport. D'où la nécessité d'une reconstruction.



Partie 1 – Figure 3.1.3 — 9 Signes de dégradations sur l'ancien Pont 9

Depuis 2005, Parcs Canada a entrepris des démarches afin de trouver une solution pour remplacer le pont actuel. Parcs Canada a été sensible au fait que les besoins municipaux ont grandement changé.

En 2006, une étude de circulation a été réalisée. Par la suite, différentes options ont été analysées ; parmi celles-ci, la possibilité de reconstruire le pont dans son axe actuel. Le reconstruire dans l'axe du chemin de la Grande-Ligne (200 mètres en amont du pont actuel) s'avérerait être plus intéressant. Cette solution a alors été étudiée de façon plus approfondie au niveau du type de structure et de la géométrie des approches.

En février 2009, les partenaires ont arrêté leur choix sur l'option d'un pont levant dans l'axe du chemin de la Grande-Ligne.

Le nouveau pont sera conforme aux normes du Ministère des Transports du Québec (MTQ). Par la présence de voies multifonctions (trottoirs et pistes cyclables) unidirectionnelles protégées, il éliminera le conflit d'utilisation entre les automobiles, les cyclistes et les piétons. En plus de la construction du pont, le projet consiste également à l'érection d'une logette et à l'aménagement des approches du pont et du site par la création d'une aire de service ainsi qu'un stationnement.

La totalité des travaux représente un investissement de l'ordre de sept millions de dollars, soit cinq millions d'euros. Le financement sera assumé par les deux gouvernements - fédéral et provincial - ainsi que par la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Les plans et devis ont été approuvés en septembre 2009. Les travaux ont commencé en juillet 2010 et sont toujours en cours.

3.2. Le nouveau Pont n°9

Afin de déterminer les caractéristiques du nouveau pont, il a été nécessaire d'identifier les contraintes, les enjeux et les attentes du client. Des solutions constructives adaptées ont alors été retenues. Dans cette partie, l'ensemble des travaux à réaliser est décrit. Cependant, l'objet de mon étude portera uniquement sur la conception du pont.

3.2.1. Des contraintes à respecter des solutions adaptées

Parcs Canada ainsi que Travaux Publics et Services Gouvernementaux (TPSG) ont formulé certaines attentes :

- Le respect du milieu environnemental ;
- La prise en compte de la valeur patrimoniale ;
- La réduction des impacts de la construction ;
- Le maintien de la période de navigation dans le canal ;
- La fonctionnalité du nouveau pont ;
- Le respect des délais ;
- La mise en valeur du Pont 9 existant ;
- La prise en considération des besoins du milieu ;
- L'intégration du futur ouvrage dans l'environnement du site ;

Ce pont est stratégique puisqu'en plus de permettre la **navigation sur le canal de Chambly** entre le 15 mai et le 15 octobre de chaque année, il dessert la population des îles Sainte-Marie et Sainte-Thérèse et est **utilisé quotidiennement par 5 000 usagers**. La construction du nouveau pont doit être réalisée sans nuire aux opérations de navigation et permettant le maintien du lien routier desservant la population des îles Sainte-Marie et Sainte-Thérèse. Pendant toute la durée des travaux, une voie routière restera ouverte à la circulation, mais la piste cyclable sera fermée. La navigation sur le canal sera maintenue, mais réduite.

Considérant que le site du Pont n° 9 est très visité et est traversé par une piste cyclable, il a été convenu de construire une logette incluant des toilettes publiques. L'architecture de ce bâtiment a été élaborée en tenant compte du milieu et de la valeur patrimoniale du canal de Chambly. En outre, une aire de service et de stationnement sera construite aux abords du pont.

Afin d'exercer une meilleure gestion de la navigation sur le canal et des opérations d'ouverture et de fermeture du pont, des feux de navigation seront installés et un système de surveillance par caméras sera implanté.

Une étude géotechnique a démontré l'importance de construire les fondations sur pieux appuyés au roc dont la profondeur est d'environ 12 mètres. Le rapport de forage est en Annexe-01.

L'espace disponible sur le site est restreint. En effet, dans ce secteur le canal de Chambly longe la route 223 et se situe à quelque 15 mètres de l'emprise routière. Ceci est une contrainte pour le choix de la structure et sa construction. Plusieurs solutions avaient été envisagées. Le type de pont retenu est actionné de façon hydraulique. Un système de contrôle a été conçu en tenant compte de la fonctionnalité et la sécurité de l'ouvrage.

Les enjeux du projet sont :

- Le maintien des activités de navigation dans le canal durant la période de navigation ;
- La coordination des équipes multidisciplinaires ;
- La complexité des calculs pour la conception du pont ;
- L'optimisation du système de levage ;
- Le système d'automatisation et contrôle bien adapté ;
- L'intégration des ouvrages dans le milieu ;
- La prise en compte de l'aspect patrimonial.

3.2.2. Description de l'ouvrage

Un des principaux critères ayant mené au choix du concept du nouveau pont 9 fut l'espace physique disponible au site du futur pont. Le nouveau pont devait donc préférablement s'ouvrir verticalement de manière à demeurer dans son axe.

Il existe plusieurs types de pont levant :

- Tablier soulevé entre piliers ;
- Le pont basculant à l'image du Tower Bridge (tablier et contrepoids tournant autour d'un axe commun) ;
- The Rolling Bridge, passerelle levante dont le mécanisme s'enroule comme la queue d'un scorpion ;
- Pont du millénaire de Gateshead, un pont rotatif pour piétons et vélos qui relie les villes de Gateshead et de Newcastle, de chaque côté du Tyne en Angleterre.

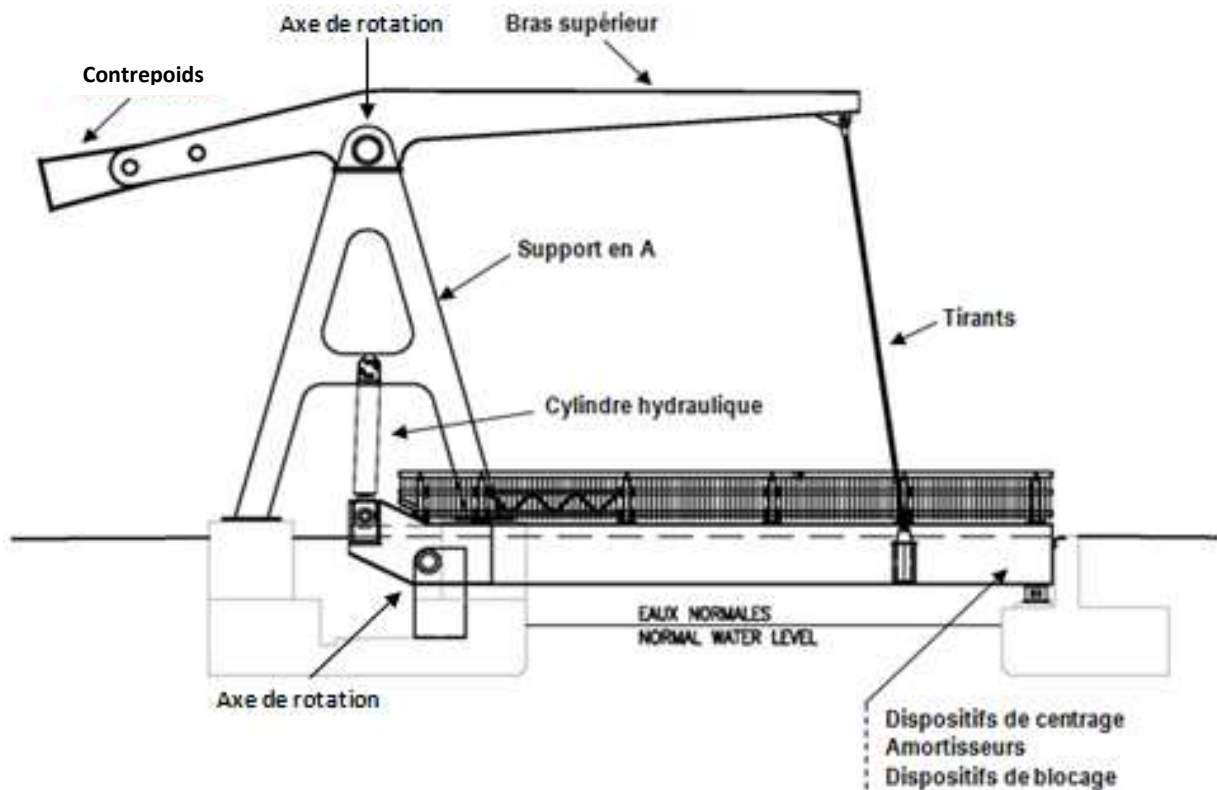


Partie 1 – Figure 3.2.2 — 10 Différents types de ponts levants

Des structures comme celles précédemment citées ont été étudiées préalablement par GENIVAR et proposées au client. Certaines solutions ont été abandonnées, comme celle d'un pont soulevé par pilier, pour des raisons d'esthétisme.

Le type de pont retenu est le pont à bascule à deux points de rotation. Le nouveau pont n°9 a été conçu selon ce principe peu utilisé en Amérique du Nord, lequel permet la construction d'un pont d'une largeur plus importante que le pont existant, et ce, dans un espace plus restreint. Le pont est composé des éléments suivants :

- Le tablier offrant une largeur carrossable de 6,7 mètres et de deux pistes multifonctions unidirectionnelles permettant le passage des piétons et cyclistes ;
- Les supports en « A » (piliers) ;
- Les bras supérieurs ;
- Les tirants assurant la liaison entre les bras supérieurs et le tablier ;
- Le contrepoids (entièrement en acier) d'une masse totale de 86,5 tonnes ;
- Les cylindres hydrauliques permettant l'activation du mouvement du pont ;
- Les dispositifs de centrage ;
- Les amortisseurs ;
- Les dispositifs de blocage.



Partie 1 – Figure 3.2.2 — 11 Descriptif du nouveau pont n° 9

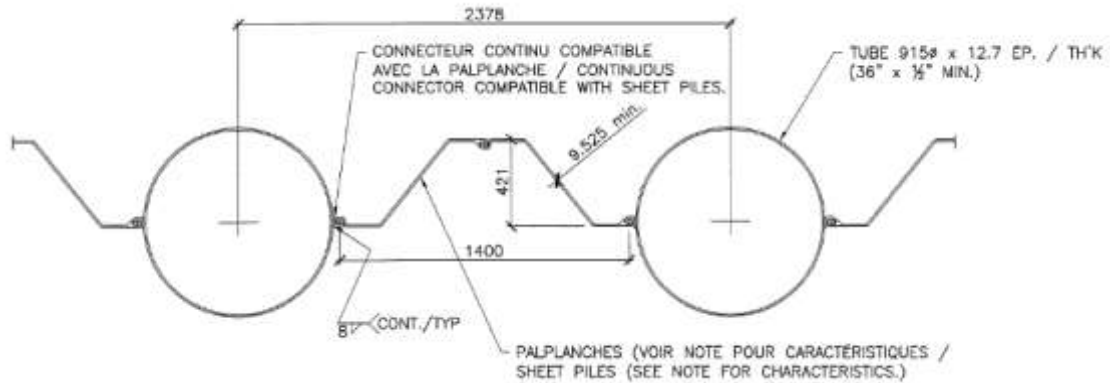
La conception du pont a nécessité une grande attention pour la structure proprement dite, ainsi que dans l'étude du mouvement du tablier et l'élaboration des plans afin que soient vérifiés tous les conflits possibles lors du mouvement du tablier.

Le pont devra se lever jusqu'à une inclinaison de 80 degrés par rapport à l'horizontale pour que soit assuré le gabarit maximal de navigation du canal.

Le système hydraulique à l'huile végétale, non nocif pour la faune et la flore, est écologique et biodégradable.

Le pont est appuyé sur des pieux et palplanches formant une paroi communément appelée « mur-combiné ». La liaison pieux-palplanche est faite avec des connecteurs en acier soudés de façon continue sur toute la longueur des palplanches.

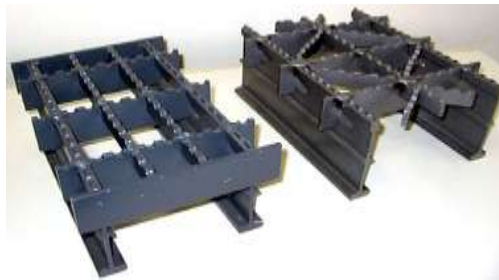
L'agencement du mur pieux-palplanche est montré Partie 1 – Figure 3.2.2 — 12. Ce mur se poursuit le long du canal de manière à guider les navires à l'approche du pont. Les pieux sont vibrofoncés et encastés au roc par trepanage, alors que les palplanches sont foncées au roc. L'agencement général des fondations est en Annexe-02.



Partie 1 – Figure 3.2.2 – 12 Agencement du mur combiné

L'acier utilisé pour les palplanches est un acier soudable 350W. Le béton utilisé pour les pieux a une résistance minimale à la compression à 28 jours de 35MPa.

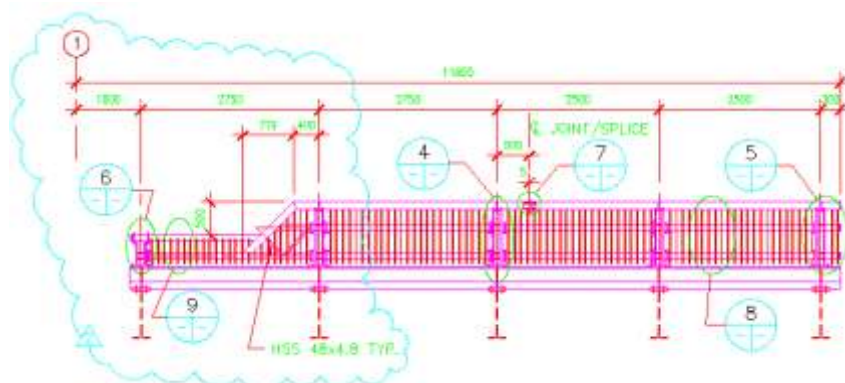
Le tablier d'une largeur carrossable de 6,7 mètres est un tablier ajouré afin de réduire les problèmes de prise au vent lors du levage. Dans le même objectif, les trottoirs sont réalisés en caillebotis.



Partie 1 – Figure 3.2.2 – 13 Tablier ajouré et caillebotis

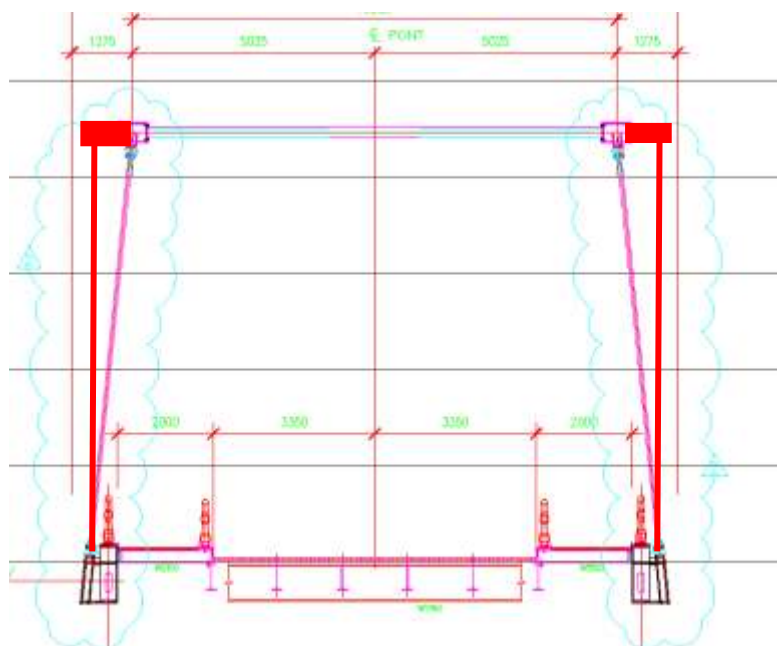
La construction d'une semelle munie de puits profonds pour assurer le mouvement adéquat des poutres principales lors du levage du tablier représente un défi intéressant lors de la construction de ce type de pont.

Pour la conception et l'aménagement de tous les éléments composant le pont, plusieurs critères ont dû être vérifiés afin que, géométriquement, il n'y ait aucun conflit. Ainsi les garde-corps séparant la chaussée des voies multifonctionnelles ont dû faire l'objet d'une conception spéciale à leur extrémité afin d'éviter tout contact avec le contrepoids lors de l'ouverture maximale du pont.



Partie 1 – Figure 3.2.2 — 14 Elévation garde-corps sur chasse-roue

Les tirants étaient initialement prévus avec un biais cependant une étude tridimensionnelle a montré que les rotules supérieures et inférieures subiraient une usure prématurée. En gardant les tirants perpendiculaires au tablier, la durée de vie de l'ouvrage ne sera pas réduite.



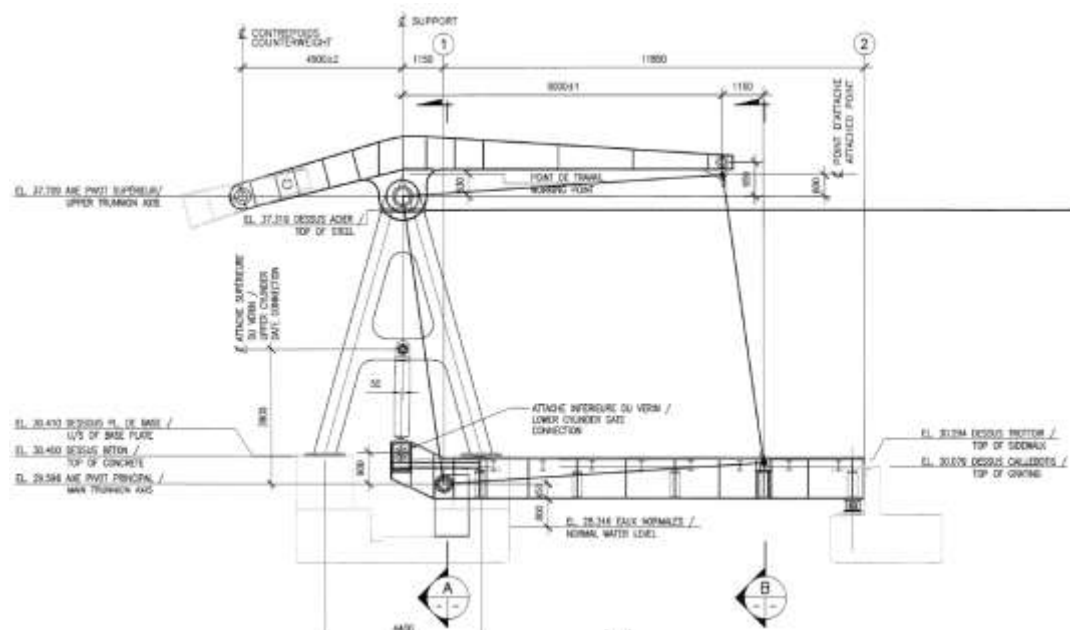
Partie 1 – Figure 3.2.2 — 15 Positionnement des tirants

La conception sismique de ce pont classé « Urgence » selon la classification proposée par la norme CAN/CSA-S6-06, a également nécessité l'ajustement de la géométrie des cadres en « A » afin que l'intégrité de la structure et des mécanismes soit assurée lors d'un séisme important. L'utilisation d'un contre poids entièrement en acier a permis de réduire considérablement le volume de cette pièce afin qu'elle soit moins imposante.

Le plan d'ensemble est en Annexe-03.

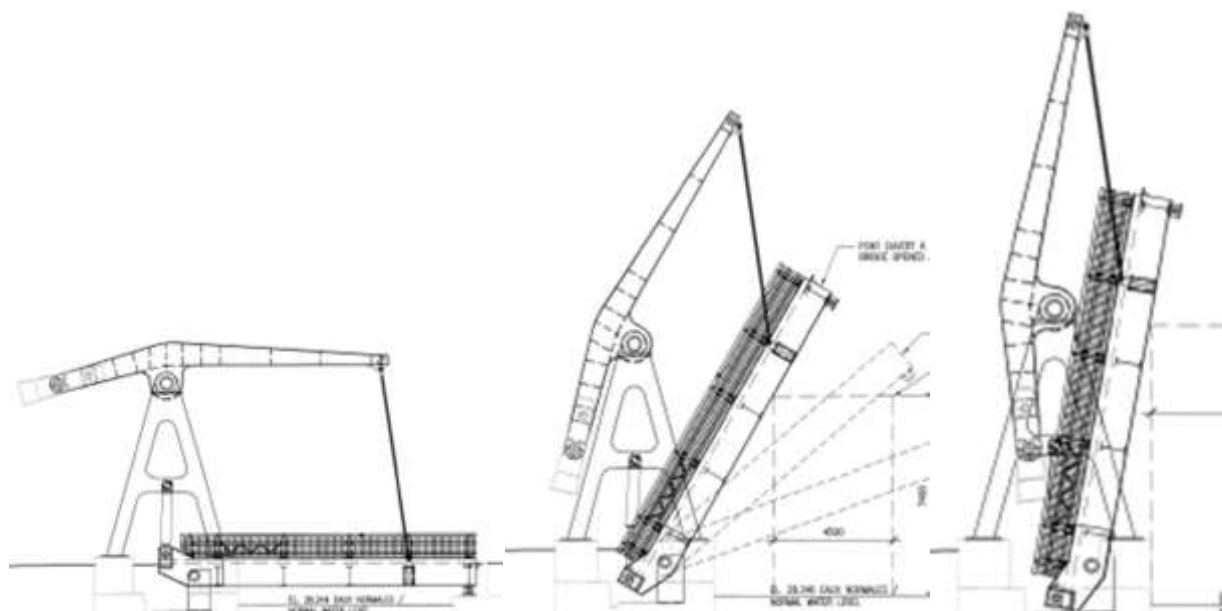
La vue isométrique est en Annexe-04.

➤ Vue en Élévation



Partie 1 – Figure 3.2.2 – 16 Vue en élévation du nouveau pont no 9

Les figures suivantes illustrent l'aspect que prendra le pont, une fois sa construction terminée.



Partie 1 – Figure 3.2.2 – 17 Positionnement du pont suivant les différents angles de levages

En analysant le mouvement des bras supérieurs et du tablier, on observe le schéma de levage montré ci-dessous. Pour assurer un mouvement sécuritaire sans surcharger les tirants, il est primordial que les arcs de cercle formés par le mouvement du tablier et des bras supérieurs soient parfaitement parallèles. Ainsi, la distance entre les points d'attache des tirants demeure constante à toutes les positions.

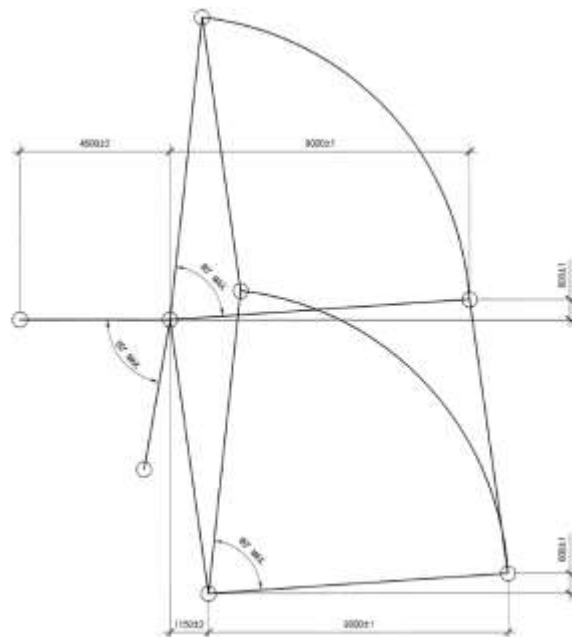
Pour assurer une condition balancée du pont, quelle que soit sa position, la géométrie des bras supérieurs et la masse totale du contrepoids ont été étudiées et optimisées de manière à ce que les droites reliant les centres de gravité inférieurs et supérieurs et leur pivot respectif soient parallèles. De cette manière, un pont à bascule à deux points de rotation dont la masse du contrepoids est correctement évaluée est parfaitement balancé à toutes ces positions lorsque la vitesse des vents est nulle.

Les cylindres hydrauliques, permettant d'activer le mouvement, assurent le mouvement sécuritaire du pont lorsque celui-ci doit être opéré lors de grands vents.

Les cylindres du pont 9 ont été conçus pour les charges de vent spécifiées au chapitre 13 de la norme CAN/CSA-S6-06 – Calcul des ponts routiers. Cette charge correspond à des rafales de vent de plus de 100 km/h. La figure 3.2-4 illustre schématiquement la position optimale des centres de gravité pour obtenir une condition balancée.

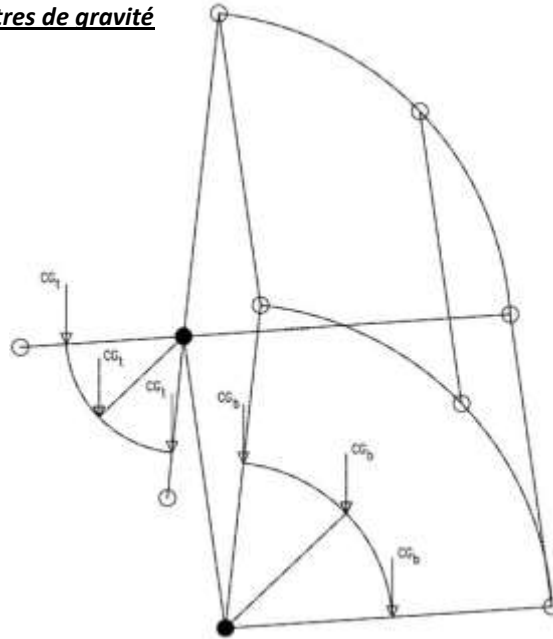
Le contrepoids a tout de même été conçu pour permettre l'ajout de masse lors du balancement final du pont avant sa mise en service final. De même, il sera également possible d'ajuster le poids du tablier en y ajoutant des masses qui pourront être fixées sous le tablier au droit de son centre de gravité. Notons que tout le pont incluant les pièces mécaniques ainsi que la structure ont été conçus en conformité avec la norme CAN/CSA-S6-06.

Schéma des points de mouvements du pont



Partie 1 – Figure 3.2.2 — 18 Schéma des points de mouvements du pont

Position optimale des centres de gravité



Partie 1 – Figure 3.2.2 — 19 Position optimale des centres de gravité

3.2.3. Exécution des travaux

Bien que mon étude porte uniquement sur la conception du pont et non sur la construction de la logette et de l'aménagement routier, toutes les étapes de la construction sont présentées afin de cerner la place de la construction dans la globalité du chantier.

Pour octroyer le contrat d'exécution des travaux, Travaux Publics et Services Gouvernementaux Canada a publié un appel d'offres public. L'entrepreneur retenu est l'entreprise québécoise Opron Construction Inc.

Les principales étapes de construction sont les suivantes :

1. Organisation de chantier

L'entrepreneur s'est mobilisé à compter du 12 mars 2010. L'utilisation optimale du site a été nécessaire afin de définir les zones de travaux, les aires d'entreposage et les emplacements pour les bureaux de chantier.

L'une des étapes importantes de l'organisation de chantier fut le choix des sous-traitants spécialisés et la coordination des interventions. Un calendrier des travaux réaliste et répondant aux besoins du client a été élaboré.

2. Enfouissement des palplanches et pieux caissons

Dès l'ouverture du chantier, l'entrepreneur a entrepris l'enfouissement des pieux caissons métal+béton au roc, incluant la construction d'une emboîture de 3 mètres de profondeur. Une plate-forme fut aménagée dans le lit du canal, et le battage des pieux caissons de 610 mm et de 915 mm fut réalisé à l'aide d'équipements spécialisés. Le défi a été de respecter la localisation et l'alignement des pieux caissons, car des palplanches devaient y être insérées. Cette opération a exigé une grande précision au niveau des culées du pont, car la charpente métallique levante devait s'asseoir sur ces fondations et la tolérance était restreinte.



Partie 1 – Figure 3.2.3 — 20 Alignement des palplanches et pieux caissons

3. Structure de béton

Considérant la précision qu'exigent les mouvements de la partie levante du pont, une grande attention est requise dans la fabrication des coffrages. Des relevés précis sont nécessaires avant chaque coulée de béton afin de s'assurer du respect des dimensions indiquées aux plans. Le contrôle de la qualité du béton de ciment est un facteur important qui sera évalué et contrôlé par un laboratoire spécialisé en contrôle des matériaux.

4. Fabrication des pièces métalliques

C'est à l'entreprise Stel-Bec Produits D'Acier Ltée de Montréal qu'a été confiée la préparation des pièces métalliques de la superstructure comprenant la charpente métallique, le contrepoids, les pivots, le tablier ajouré, les caillebotis pour trottoirs et autres pièces faisant partie de l'ensemble. La fabrication est présentement en cours. Les dimensions de chaque pièce doivent être vérifiées et validées par des dessins d'atelier qui doivent être approuvés par le concepteur. Une firme en services industriels a été mandatée pour le suivi qualitatif des matériaux utilisés et le contrôle de la fabrication. Cette étape est très importante considérant que la précision et la qualité des pièces métalliques doivent être sans faille pour le bon fonctionnement de l'ensemble du pont.



Partie 1 – Figure 3.2.3 — 21 Tablier ajouré fabriqué en usine



Partie 1 – Figure 3.2.3 — 22 Cadre en A et bras supérieur fabriqués en usine

5. Mise en place de la structure métallique

Avant la livraison des pièces sur le chantier, l'entreprise Stel-Bec Produits d'Acier Ltée devra faire un assemblage en usine afin de vérifier la conformité de la structure métallique. Le transport des pièces devra faire l'objet de permis de transport considérant leurs dimensions et leur poids.

6. Système hydraulique

Le pont levant sera muni d'un système hydraulique qui sera conforme à la norme CAN/CSA S6-06 (Code Canadien sur le Calcul des ponts routiers). Des exigences de mise à l'essai ont été définies et l'entrepreneur devra remettre un manuel d'opération et un manuel d'entretien avant la mise en service.

Ce travail spécialisé est un élément important pour le bon fonctionnement du pont levant. Des calculs élaborés ont été faits afin d'optimiser ce système, qui sera opéré à l'aide d'un équipement de contrôle et instrumentation bien adapté aux besoins et à l'usage des opérateurs.

7. Automatisation et contrôle

L'opération du pont levant nécessite un système d'automatisation et contrôle qui permet de bien gérer l'ensemble des équipements. En plus de l'ouverture et de la fermeture du pont, un contrôle doit être exercé pour la gestion de la circulation sur les approches du pont (barrières). Il en est de même pour la circulation des bateaux qui est guidée par des feux de navigation. De plus, des caméras seront installées afin de visualiser les ouvertures et fermetures du pont et la présence de bateaux dans le canal. Le système d'automatisation et contrôle sera conçu de façon à gérer efficacement tous ces équipements ; il sera à la fine pointe technologique tout en demeurant bien adapté aux besoins et facile à opérer.

8. Feux de navigation, caméras, barrières

Des feux de navigation sont prévus sur les nouveaux murs de part et d'autre du pont. Des caméras et des barrières seront également installées et pourront être contrôlées par l'opérateur du pont. Leur déclenchement sera intégré dans le système automatisé pour assurer la sécurité des usagers de la route lors de l'ouverture du tablier.

9. Logette

À proximité du pont levant, une logette sera construite. Ce bâtiment sera le centre de contrôle du pont levant. On y retrouvera les équipements du système hydraulique, le tableau de commande du système d'automatisation et contrôle et le poste de travail du pontier. De plus, afin d'offrir un service aux visiteurs et aux utilisateurs de la piste cyclable, des toilettes publiques y seront aménagées. La localisation de ce bâtiment a été déterminée afin d'assurer une grande visibilité permettant d'observer les opérations d'ouverture et de fermeture du pont, ainsi qu'une vue sur une longueur optimale sur le canal. Cette logette plus moderne a été conçue avec une architecture qui respecte le site patrimonial.

10. Travaux routiers

Le nouveau pont est construit dans l'axe du chemin de la Grande-Ligne formant une première intersection avec la route provinciale 223 et une seconde avec le chemin municipal Sainte-Thérèse. Des travaux routiers seront effectués afin d'aménager des intersections fonctionnelles et sécuritaires.

11. Aménagement du site

Le site est très visité par les cyclistes, les touristes et les vacanciers. Par conséquent, Parcs Canada désire l'aménager de façon à créer un attrait touristique. Un sentier pour piétons sera construit, un système d'éclairage décoratif y sera installé. La principale intervention sera la mise en valeur du pont actuel. Cette structure sera stabilisée dans une position parallèle au canal (ouverture). Des travaux de réfection seront réalisés, consistant à la remise en état du tablier ainsi que la réparation de la structure métallique et à la repeinte de l'acier. Ces travaux assureront au pont existant de nombreuses années d'existence qui rappelleront la valeur patrimoniale de ce site.

12. Balancement et mise en service du pont

Le balancement et la mise en service du pont ont eu lieu au mois de juin 2011.

3.2.4. Situation actuelle

À mon arrivée, la logette était construite, les cadres en "A" et le tablier avaient été mis en place.

Le 18 mai l'ensemble supérieur du pont à été assemblé avec le reste de la structure. Le 7 juin à eu lieu le premier essai de levage. Des ajustements techniques ont eu lieu. En effet, le poids du contrepoids n'était pas suffisant pour permettre aux cylindres de lever la structure. Des plaques d'acier ont été rajoutées dans le contrepoids aux endroits prévu à cet effet, environs 4 tonnes, afin de permettre le mouvement du tablier. Le 8 juin le tablier à pu être levé de 0 à 80 degré.

Les travaux de voirie sont en cours.

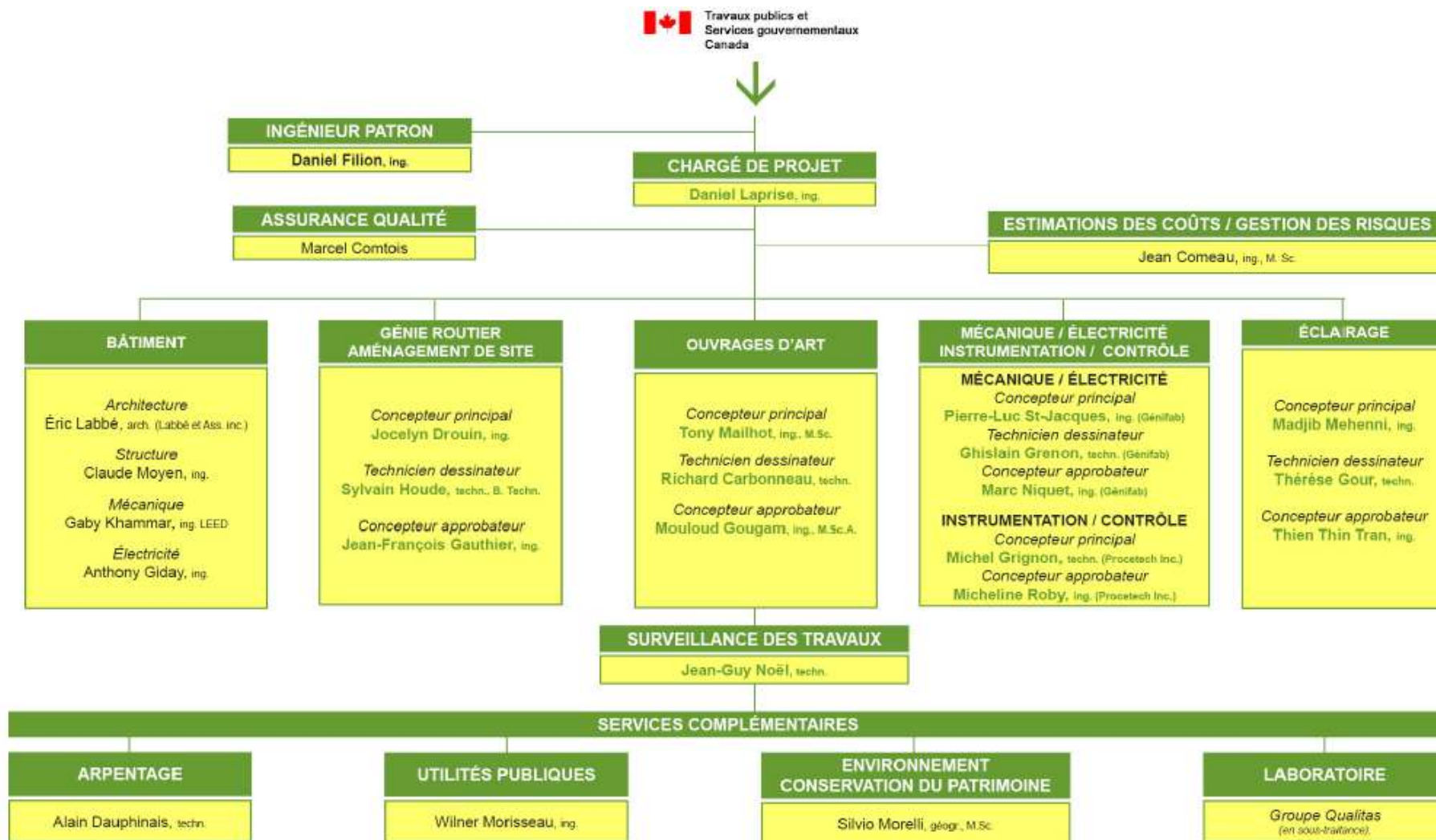


Partie 1 – Figure 3.2.4 — 23 Tablier levé à 80 degrés

3.3. Organigramme du projet

Considérant la nature multidisciplinaire du projet, GENIVAR a identifié tous les champs d'activités impliqués et a mis en place une équipe de spécialistes dans les différents domaines. En complément à ses équipes internes (structure, voirie, infrastructures municipales, mécanique du bâtiment, électricité, hydraulique lourde, automatisation et contrôle), GENIVAR a fait appel à la firme GENIFAB pour la conception des pièces mécaniques du pont (pivots et dispositifs de sécurité), et au bureau d'architecture Jacques Monty pour la préparation des plans relatifs à la logette.

Tout au long de l'avancement de la préparation des plans et devis, de nombreuses rencontres et discussions se sont tenues afin de valider les solutions retenues et s'assurer de bien répondre aux attentes du client.



Partie 1 – Figure 3.3 — 24 Organigramme du projet

4. Démarche suivie

Le sujet de mon Projet de Fin d'Études consiste à **comparer les Eurocodes et la norme CAN/CSA S6-06 appliquée à la conception d'un pont levant en structure métallique**. Il est important de ne pas perdre l'optique d'établir une comparaison entre les deux règlements tout au long du projet. Cette partie du rapport présente la méthode que j'ai utilisée pour mener à bien le projet, les deux systèmes normatifs ainsi que les logiciels utilisés et le planning établi.

4.1. Organisation de mon travail

Afin de mener à bien mon Projet de Fin d'Études et de répondre à la problématique posée par le sujet, j'ai dans un premier temps, réalisé un schéma euristique. Ce schéma m'a permis de détailler les divers points à aborder et de ne pas négliger les contraintes posées par le sujet et imposées par l'INSA afin d'organiser mon travail de manière efficace et de ne négliger aucun aspect du projet.

Une fois le schéma euristique établi (cf. 5. Schéma euristique) j'ai découpé mon travail en 5 phases principales :

- Phase de compréhension du projet
 - Lecture des plans
 - Connaissance de l'état actuel
- Phase de lecture des normes canadiennes et européennes
 - Différences notables entre les règlements
- Phase de calculs
 - Aux normes canadiennes
 - Aux normes européennes
- Phase de synthèse
 - Impact sur le dimensionnement
 - Impact sur l'enveloppe budgétaire
- Phase de rédaction
 - Rapport intermédiaire 1
 - Rapport intermédiaire 2
 - Rapport final
 - Poster
 - Présentation visuelle (PowerPoint)

Ensuite, j'ai détaillé les diverses tâches à effectuer. De plus, j'ai établi une Table des Matières des principaux calculs à réaliser pour un tel projet. Cette table m'a servi de base pour établir un planning. Différents livrables ont été demandés avec des dates à respecter. Ils articulent mon planning (cf. 4.5. Planning de mon travail).

4.2. Présentation des normes utilisées

4.2.1. Normes canadiennes

Au Canada, la conception d'un ouvrage d'art doit tenir compte des exigences de la norme CAN CSA S6-06 du code canadien sur le calcul des ponts routiers. Outre le code fédéral, les réglementations provinciales sont bien sûr en vigueur. Ainsi, au Québec les exigences du Tome III – Ouvrages d'art des normes du Ministère des Transports du Québec et les indications présentes dans le Manuel de conception des structures Volume I doivent aussi être prises en considération.

La norme CAN/CSA S6-06 est séparée en différentes sections qui expliquent les points de conception à suivre pour définir la structure d'un pont.

Dans le cas précis du pont levant en structure métallique et infrastructure béton les parties utilisées sont :

Partie 1 Généralités : chapitre donnant les dimensions et autres indications (classe de route par exemple) sur la géométrie pour un pont ;

Partie 2 Durabilité : chapitre proposant des solutions pour améliorer la durabilité ;

Partie 3 Charges : chapitres donnant la définition de toutes les charges devant être prises en compte pour le dimensionnement d'un pont (charges permanentes, surcharges routières, déformations...), les coefficients de réductions des charges selon les états limites, les combinaisons de charges ;

Partie 4 Calcul parasismique : chapitre sur le parasismique ;

Partie 5 Méthode d'analyse : chapitre donnant les principes de l'analyse d'une structure, le type de modélisation simplifiée ou raffinée, les calculs à traiter et les méthodes de vérification ;

Partie 6 Fondation : chapitre sur les fondations ;

Partie 8 Béton : chapitre sur le matériau béton donnant les dimensions, les enrobages minimums pour le type de dalle concernant le projet ainsi que le type de ferrailage ;

Partie 10 Acier : chapitre sur l'utilisation de l'acier et du mixte acier-béton qui donne les limites de résistance selon les cas de chargement ;

Partie 11 Joints et appuis : chapitre sur les méthodes de dimensionnement des joints de tabliers et des appuis ;

Partie 12 Dispositif de retenue : chapitre sur les dispositifs de retenue ;

Partie 13 Pont mobile : chapitre sur les ponts levant ou pivotant.

Le Tome III Conception des ouvrages d'art, norme imposée par le MTQ, décrit la conception des ouvrages. Elle donne des indications sur la classification des ouvrages, la conception des ouvrages d'art, les ponts, les ponceaux (portique de type ouvert ou fermé), murs, signalisations et éclairages, inspection, évaluation et entretien.

4.2.2. Normes européennes

Les Eurocodes sont les normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil.

Ils sont divisés en 10 groupes de textes et traitent des aspects techniques du calcul de structures et du calcul au feu des bâtiments et ouvrages de génie civil. Chaque famille est constituée d'une partie générale (partie 1-1), d'une partie concernant l'incendie (partie 1-2), d'une partie 2 concernant les ponts (si d'application) et d'autres parties spécifiques.

L'analyse et le dimensionnement de l'ouvrage s'effectueront à l'aide des Eurocodes suivants :

Eurocodes 1: Actions sur les structures.

Eurocodes 1 Partie 3: Définit géométriquement et numériquement les modèles de charges à considérer dues au trafic lors de l'établissement de projets de ponts-routes, de passerelles pour piétons et cyclistes et de ponts-rails (modèles de charges verticales et horizontales, variables et accidentelles) pour les vérifications vis-à-vis des différentes catégories d'états limites : de service, ultime et de fatigue. Il fournit également les règles de combinaison des actions dues au trafic avec d'autres actions variables, basées sur le format semi-probabiliste de justification de la sécurité des constructions.

Eurocodes 1 Partie 5: donne les principes et les règles pour le calcul des actions de la température et de leurs effets sur les bâtiments, ponts et autres structures.

Eurocodes 2 Partie 3 : calcul des structures en béton ; Fondation en béton. Calcul des éléments de fondation en béton destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil et porte sur les exigences de stabilité, de résistance, d'aptitude à l'emploi et de durabilité de ces éléments.

Eurocodes 3 Partie 2 : Calcul des structures en Acier : Pont en structure métallique.

Eurocodes 7: Calcul géotechnique ;

Eurocodes 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes ;

4.2.3. Concordance entre les normes

Eurocodes 1 Partie	Actions	CAN/CSA S6
1	Bases de calcul	3.5
2.1	Permanentes	3.5.2
2.3	Neige /Glace	3.12
2.4	Vent	3.10
2.5	Thermiques	3.9.4
2.6	Construction	3.16.4.2
2.7	Accidentelles	3.15
3.	Trafic	3.8

Partie 1 – Tableau 4.2.3— 1 Concordance des normes

4.3.Présentation des logiciels utilisés

4.3.1. Logiciels de modélisations

Afin de comparer les règlements, les vérifications sont effectuées pour les deux normes. Les logiciels de modélisation utilisés seront le logiciel Advance Design America version 2010 et Robot Structural Analysis 2011.

Le logiciel utilisé pour la modélisation est le logiciel Advance Design America version 2010. Pour cet ouvrage, la fonction à utiliser est « design acier » qui inclut la fonction « calcul des charges mobiles » qui permet la définition des surcharges routière.

Différentes normes de calcul peuvent être utilisées par le logiciel pour les calculs :

- American Association of State Highway Transportation Officials. (USA)
- American Society of Civil Engineer. (USA)
- Code National du Bâtiment version 1995 et 2005. (Canada)
- CAN/CSA S6 version 2006. (Canada)

Pour notre ouvrage, le code applicable est le CAN/CSA S6-06, les calculs seront donc basés sur celui-ci. Les combinaisons seront générées selon cette norme. La modélisation sera faite en 3D.

Le logiciel Robot permettra de générer les combinaisons de charge nécessaire pour l'étude aux Eurocodes.

4.4. Présentation des tâches à réaliser

- 1- Comparaison des normes sur les points suivants :
 - a. Calculs des charges
 - b. Calculs structure métallique
 - c. Calculs fondation béton
 - d. Analyse sismique
- 2- Calcul de dimensionnement aux normes canadiennes suivant le détail ci-dessous ;

Normes et Critères de conception

- Matériaux
- Camion de conception
- Combinaison de charges
 - États limites d'utilisation
 - Vent
 - Neige
 - Température
- États limites ultimes

Calcul des masses de centres de gravité

- Tablier
- Centre de gravité inférieur
- Éléments supérieurs (bras, tirants, contrepoids et poutre transfert avant)
- Centre de Gravité supérieur

Analyse du mouvement (Position 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 degrés)

- Diagrammes des centres de gravité pour chaque position étudiée
- Calcul des efforts dans les cylindres et les tirants
 - Conditions de vents nuls
 - Conditions de vents dominants (Est vers Ouest)
- Conditions de vents Ouest vers Est
 - Calcul des réactions d'appui en cours de levage
 - Pivot supérieur
 - Pivot inférieur

Analyse structurale et dimensionnement

Éléments supérieurs

Analyse globale

- États limites d'utilisation (ELUT)
- Etat limite Ultime (ELUL)

Bras supérieurs

- Calcul des propriétés géométriques des bras supérieurs – A, I_x, I_y, C, J (section fermée)
- Calcul du poids des bras supérieurs (kN/m)
- Diagrammes de corps libre pour chaque position étudiée
- Calcul des efforts de flexion, de cisaillement, de compression et de torsion
- États limites d'utilisation (ELUT)
- Etat limite ultime (ELUL)
- Diagramme des efforts tranchants – Pour chaque position étudiée
- Diagramme des efforts de torsion – Pour chaque position étudiée

- Diagramme des efforts de compression
- Calcul des réactions d'appui (pivot supérieur)
- Calcul des flèches avant et arrière pour chaque position étudiée
- Dimensionnement
- Vérification du dimensionnement

Poutre de transfert

- Calcul des propriétés géométriques des bras supérieurs – A, I_x, I_y, C, J (section fermée)
- Calcul du poids de la poutre (kN/m)
- Diagrammes de corps libre pour chaque position étudiée
- Calcul des efforts de flexion, de cisaillement, de compression et de torsion
- Diagramme des efforts de flexion – Pour chaque position étudiée
- Diagramme des efforts tranchants – Pour chaque position étudiée
- Diagramme des efforts de torsion – Pour chaque position étudiée
- Diagramme des efforts de compression
- Calcul des flèches (pour chaque position étudiée)
- Dimensionnement
- Vérification du dimensionnement

Tirants

- Calcul des propriétés géométriques des tirants – A
- Calcul du poids des tirants (kN)
- Calcul des efforts de traction – Pour chaque état limite étudié
- Diagramme des efforts de traction
- Calcul des déformations unitaires des tirants (pour chaque position étudiée)

Contrepoids

- Calcul des propriétés géométriques du contrepoids – A, I_x
- Diagrammes de corps libre pour chaque position étudiée
- États limites d'utilisation (ELUT)
- Etat limite ultime (ELUL)
- Calcul des efforts de flexion et de cisaillement
- Diagramme de flexion et de cisaillement
- Calcul des réactions aux supports du contrepoids
- Flèches du contrepoids – Pour chaque position étudiée
- Dimensionnement
- Vérification du dimensionnement

Éléments inférieurs

Analyse globale

- États limites d'utilisation (ELUT)
- Etats limites ultime (ELUL)

Tablier inférieur (Poutres principales, Poutres transversales, Longerons)

- Calcul des propriétés géométriques des éléments – A, I_x, I_y, C, J
- Calcul du poids de chacun des éléments (kN)
- Diagrammes de corps libre pour chaque position étudiée
- Etats limites d'utilisation (ELUT)
- Etat limite ultime (ELUL)
- Calcul des efforts de flexion, de cisaillement, de compression et de torsion
- États limites d'utilisation (ELUT)
- Etat limite ultime (ELUL)
- Diagramme des efforts tranchants – Pour chaque position étudiée

Diagramme des efforts de torsion – Pour chaque position étudiée
Diagramme des efforts de compression
Calcul des réactions d'appui (pivot inférieurs)
Calcul des flèches pour chaque position étudiée
Dimensionnement
Vérification du dimensionnement

Piliers (cadre en « A »)

Sommaire des réactions d'appui
État limite d'utilisation (ELUT)
Etat limite ultime (ELUL)
Dimensionnement

Analyse sismique

Analyse structurale sismique

Vue d'ensemble de la structure
Critère de conception
Analyse structurale
Etat limite ultime (ELUL)
Vérification des piliers
Calcul et dimensionnement des ancrages

- 3- Calculs similaires aux normes Européennes
- 4- Établir une comparaison sur le dimensionnement (ratio d'acier)
- 5- Établir une comparaison sur le prix de chaque version
- 6- Synthèse des résultats

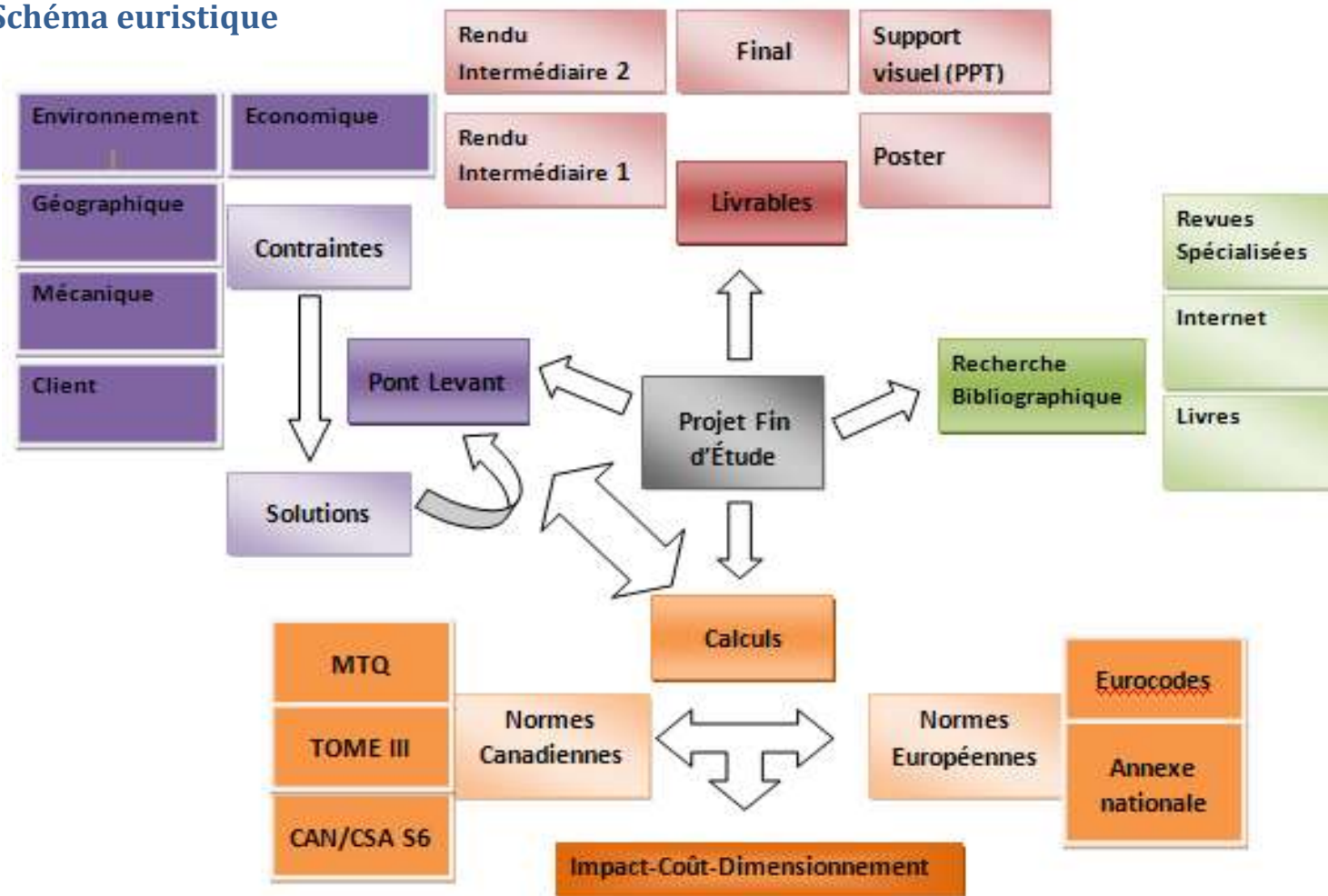
4.5.Planning de mon travail

Après avoir établi les différentes tâches précédemment citées, j'ai établi un planning à respecter. Bien entendu, les dates des différents livrables sont des dates clés. J'ai articulé mon planning en fonction de celles-ci.

Année	2011																																			
Mois	Mars				Avril				Mai					Juin				Juillet					Août				Septembre				Octobre					
	6	13	20	27	3	10	14	27	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	
PFE au sein de Génivar																																				
Rendu intermédiaire 1										6																										
Rendu intermédiaire 2															17																					
Final																																				
Soutenance PFE																																				
Support visuel (poster +ppt)																																				
Rédaction																																				
Comparaison des normes																																				
Etude géométrique																																				
Charges et combinaisons																																				
Modelisation																																				
Dimmensionement partie sup																																				
Dimmensionement partie inf																																				
Verification dim. Sup																																				
Verification dim. Inf																																				
Synthèse influence sur dim.																																				
Synthèse influence sur coût																																				

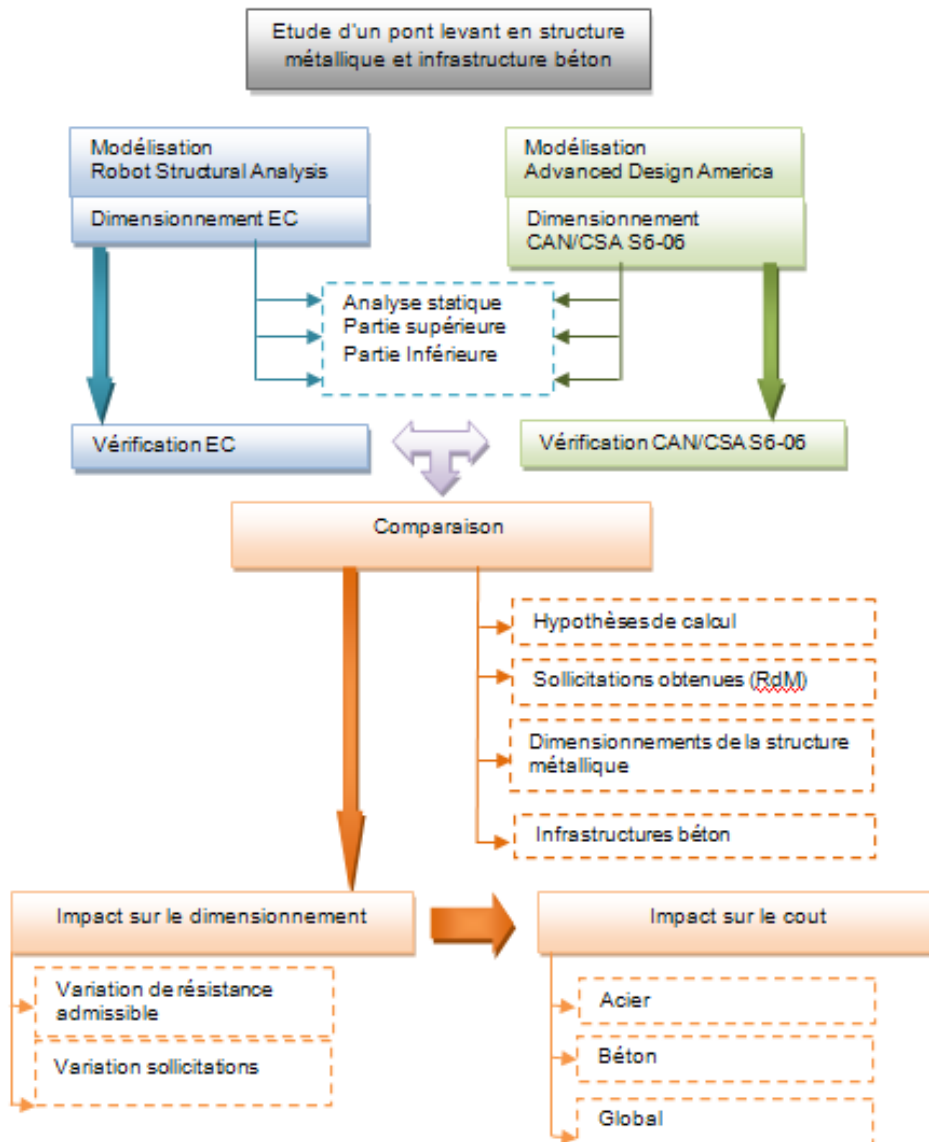
Partie 1 – Figure 4.5 — 25 Planning

5. Schéma euristique



Partie 1 – Figure 5 — 26 Schéma euristique

La démarche suivie pour répondre à la problématique du projet peut être résumée par le schéma suivant :



Partie 1 – Figure 5 — 27 Démarche suivie



Partie 2

Différences notables entre les règlements

Cette partie présente pour chaque étape majeure de la conception les différences principales entre les deux normes.

- Les hypothèses de calculs ;
- Les combinaisons de charges ;
- La justification d'une section ;
- Le calcul sismique.

La présente partie est structurée comme suit :

SOMMAIRE

1. HYPOTHESES DE CALCULS.....	44
1.1. MATERIAUX	44
1.2. CHARGES PERMANENTES.....	44
1.3. CHARGES DE TRAFIC ROUTIER.....	45
1.3.1. Nombre de voies	45
1.3.2. Modèle de charge	45
1.3.3. Coefficient de majoration dynamique	47
1.4. FORCES DE FREINAGES	47
1.5. ACTION SUR LES TROTTOIRS	48
1.6. ACTION THERMIQUE	48
1.6.1. Coefficient de dilatation thermique.....	48
1.6.2. Composante uniforme et gradient thermique	48
2. JUSTIFICATION D'UNE SECTION	48
2.1. DEMARCHE DE JUSTIFICATION D'UNE SECTION SELON EUROCODE 3	49
2.1.1. Justification en flexion	49
2.1.2. Justification à l'effort tranchant	49
2.1.3. Résistance au voilement sous cisaillement	50
2.1.4. Interaction flexion et effort tranchant.....	50
2.1.5. Vérification de la rigidité des raidisseurs	51
2.1.6. Vérification au déversement.....	51
2.2. DEMARCHE DE JUSTIFICATION D'UNE SECTION SELON CAN/CSA S6-06	51
2.2.1. Etat limite ultime	51
2.2.2. Vérification des contraintes ELF.....	51
2.2.3. Vérification de la flèche à l'ELUT.....	53
3. ANALYSE SISMIQUE	53
3.1. CATEGORIE D'IMPORTANCE	53
3.2. PONT A TRAVÉE SIMPLE	53

1. Hypothèses de calculs

1.1. Matériaux

➤ Caractéristiques de l'acier

L'application des Eurocodes n'entraîne aucun changement dans la prise en compte des paramètres caractéristiques de l'acier :

- ✚ Module d'élasticité longitudinale : $E_s = 210\,000\text{ MPa}$;
- ✚ Coefficient de poisson : $\mu = 0,3$;
- ✚ Module d'élasticité transversale : $G = 81\,000\text{ MPa}$;
- ✚ Coefficient de dilatation linéaire : $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$;
- ✚ Masse volumique de l'acier : $\rho = 78,5\text{ KN/m}^3$;

➤ Nuance de l'acier suivant les normes Canadienne

La nuance de l'acier des éléments d'un ouvrage d'art doit être conforme au tableau 2.10-1 du Tome III – Ouvrage d'art, des Normes du Ministère. De façon générale, en ce qui concerne les pièces structurales principales, les diaphragmes, les contreventements et les poutres de levage, la nuance de l'acier à spécifier doit être conforme à celle indiquée ci-dessous :

NORME CAN/CSA-G40.21	
Pièces structurales principales	Diaphragmes, contreventements et poutres de levage
350AT	350A, 350W ou 300W
350WT	350W ou 300W

Partie 2 – Tableau 1.1 — 2 Nuance de l'acier suivant les normes Canadienne

Acier W : acier soudable;

Acier A : acier patinable et soudable;

Acier WT : acier soudable à résilience amélioré;

Acier AT : acier patinable et soudable à résilience amélioré.

Remarque : Les profilés laminés en acier de types WT et AT ne sont pas disponibles au Canada.

1.2. Charges permanentes

Le poids propre des matériaux de construction est défini dans l'EC1-1-1 annexe A. Les Eurocodes prévoient une variation pour le calcul du poids propre du revêtement et de l'étanchéité, soit $\pm 20\%$ si l'épaisseur totale tient compte d'un revêtement postérieur, sinon $+40\%$ et -20% . Pour le calcul du poids propre des éléments structuraux, les Eurocodes prennent la valeur nominale.

D'après la norme CAN/CSA S6-06, tous les éléments structuraux doivent prendre en compte une variation de +20 % et -10 %. Pour les éléments métalliques produits en usine une variation de +10 % et -5 % doit être tenue en compte.

1.3. Charges de trafic routier

Les charges de trafic routier sont définies dans L'Eurocode 1-2 « Actions sur les ponts » et dans le chapitre 3.8 de la norme CAN/CSA S6.

1.3.1. Nombre de voies

Le nombre de voies est défini en fonction de la largeur de la voie carrossable déterminée entre les bordures.

L'Eurocode 1-2 fait apparaître les notions de voies conventionnelles et d'aire résiduelle. Les voies conventionnelles supportent la totalité des charges de trafic routier alors que l'aire résiduelle n'en supportera qu'une partie. L'Eurocodes 1-2 fixe la largeur d'une voie conventionnelle à 3m ce qui induit la dimension de l'aire résiduelle.

La notion d'aire résiduelle n'existe pas dans la norme canadienne. La norme canadienne définit la largeur de la voie en fonction de la largeur de la voie carrossable et du nombre de voies.

Aux Eurocodes les voies sont numérotées. La voie numéro 1 doit donner l'effet le plus défavorable à l'ouvrage.

1.3.2. Modèle de charge

Le modèle de charge ne se détermine pas de la même manière suivant les deux règlements. Cependant la philosophie d'une charge uniforme et d'une charge d'essieu est commune malgré des modalités d'application différentes.

Eurocodes

L'EC1-2 définit quatre modèles de charges verticales pour le trafic (LM1, LM2, LM3 et LM4).

Le modèle de charge LM1 regroupe une charge uniformément répartie UDL et une charge concentrée à doubles essieux TS. L'intensité de ces deux charges est définie à partir de la classe de l'ouvrage. Aux Eurocodes, la charge uniforme n'est pas répartie avec la même intensité sur toute la largeur de chaussée. En effet son intensité est réduite sur l'aire résiduelle par rapport à la voie conventionnelle. Quant à la charge concentrée TS, un seul tandem peut circuler sur chaque voie conventionnelle. De plus, la circulation du tandem est imposée transversalement dans l'axe des voies. La charge concentrée TS est elle aussi appliquée avec une intensité différente sur les voies conventionnelles et inexistantes sur l'aire résiduelle.

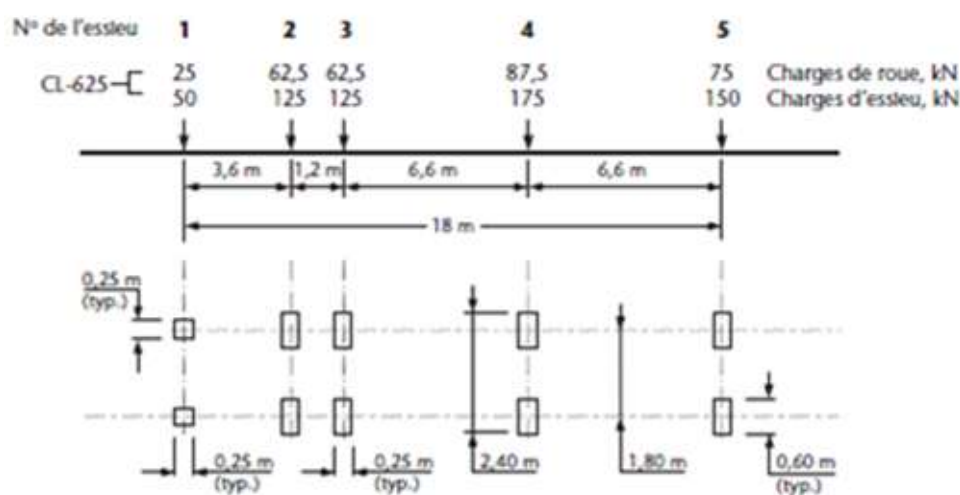
Le modèle de charge LM2, un essieu unique, est appliqué en un point quelconque de la chaussée. Le modèle LM2 est limité à un essieu unique.

Le modèle de charge LM3 correspond aux véhicules spéciaux.

Le modèle de charge LM4 correspond à un chargement de foule. Ce modèle n'est pas à prendre en compte dans notre cas.

Norme CAN/CSA S6-06

Le calcul des efforts causés par les surcharges routières sur un pont s'effectue au moyen du camion standard CL-625. Ce camion est composé de 5 essieux dont les charges sont différentes et spécifiquement indiquées dans la norme (cf. figure).



Partie 2 – Figure 1.3.2— 28 Charges des essieux du camion CL-625

La surcharge de voie comprend un camion, dont la charge de chaque essieu est réduite à 80 %, superposée à une charge uniformément répartie de 9 kN/m² dont la largeur est de 3,0 m. La surcharge de voie CL. Lorsque plus d'une voie de calcul est chargée, la surcharge routière doit être multipliée par un facteur de modification.

La surcharge routière doit être répartie transversalement sur le tablier d'un pont. Cette surcharge occupe une largeur de trois mètres sur chacune des voies de la chaussée et la largeur de ces voies de circulation dépend de la largeur de la voie carrossable du pont. La possibilité que plus d'une voie de circulation puisse, au même moment, produire les efforts maximaux sur la structure est prise en compte par l'application d'un facteur de modification des charges.

Aux fins de calcul à l'état limite ultime et à l'état limite d'utilisation, la surcharge routière doit être placée à l'intérieur de chaque voie de calcul de façon à produire la sollicitation maximale.

Aux fins de calcul à l'état limite de fatigue et à l'état limite d'utilisation pour la flèche de la membrure, la surcharge routière est fixée à un seul camion placé au centre d'une voie de circulation. La surcharge de voie ne doit pas être prise en compte.

Une surcharge due à un véhicule d'entretien doit être prise en compte uniquement si les caractéristiques de l'ouvrage le permettent. Dans notre cas le trottoir étant inférieur à 3 m, cette surcharge n'est pas applicable.

1.3.3. Coefficient de majoration dynamique

Eurocodes

La majoration dynamique est incluse dans l'intensité des charges du modèle LM1 et LM2. Elle n'est à rajouter que pour le modèle de charge LM3. Sa formule de calcul définis pour la prise en compte des véhicules spéciaux ne tient plus compte de la charge permanente et de la charge maximale (EC1-2 NA §Annexe3 (3)).

$$\delta = 1 + \frac{0.7}{1 + 0.2L}$$

Norme CAN/CSA S6-06

On doit appliquer un coefficient de majoration dynamique (CMD) au camion CL-625 ou a toute partie du camion. Le CMD à appliquer au camion CL-625 est spécifique au nombre d'essieux sollicitant l'effort maximal à une section donnée d'un élément analysé.

La surcharge de voie CL-625 est toujours exempte d'une majoration du CMD (autant sur la fraction de camion CL-625 que de la charge uniforme).

Portée (m)	Essieux déterminants (kN)	CMD applicables
0 à 2,4375	175	0,4
2,4375 à 4,8	125,125	0,3
4,8 à 9,8085	50, 125,125	0,3
9,8085 à 14,4	125, 125,175	0,25
14,4 à 36,6	125, 125, 175,150	0,25
36,6 à 50	50, 125, 125, 175,150	0,25

Partie 2 – Tableau 1.3 — 3 Choix du CMD à appliquer en fonction de la portée de l'ouvrage

1.4. Forces de freinages

Eurocodes

L'EC1-2 définit une force de freinage globale. Celle-ci dépend de l'intensité des charges verticales du cas de charge LM1 et est bornée à : $180\alpha_{Q1} < Q_{1k} < 900\text{kN}$

Norme CAN/CSA S6-06

La norme CAN/CSA S6-06 propose de prendre en compte une force de freinage équivalente à 180kN plus 10 % de la portion de surcharge de voie uniformément répartie d'une voie de calcul. Cette force est bornée à : $180 + 1.10 \times 9 \times L \leq F_f \leq 700\text{kN}$ Avec L la longueur du tablier.

1.5. Action sur les trottoirs

Aux Eurocodes l'action sur les trottoirs est fixée à 5kPa. La norme canadienne la détermine en fonction de la largeur du chemin piétonnier chargé et doit être comprise entre 1.6 et 4kPa.

1.6. Action thermique

1.6.1. Coefficient de dilatation thermique

Quelque soit la norme il dépend du matériau considéré.

1.6.2. Composante uniforme et gradient thermique

Les deux règlements définissent les composantes de température suivant le type d'ouvrage et sa localisation géographique.

Les ouvrages sont classés suivant le type d'ossature:

Eurocodes 1 Partie 1-5	Descriptions	CAN/CSA S6 3.9.3
Type 1	Poutres d'acier, poutres-caissons ou poutres triangulées avec platelages en acier, et poutres triangulées à tablier inférieur.	Type A
Type 2	Poutres d'acier, poutres-caissons ou poutres triangulées à tablier supérieur avec platelages en béton.	Type B
Type 3	Ossatures en béton avec platelages en béton.	Type C

Partie 2 – Tableau 1.6 — 4 Type d'ossature

L'effet du gradient thermique et celui du retrait doivent être considérés dans les zones de moment négatif même si la section d'acier n'est pas mixte, en raison de la présence d'un nombre minimal de goudrons.

2. Justification d'une section

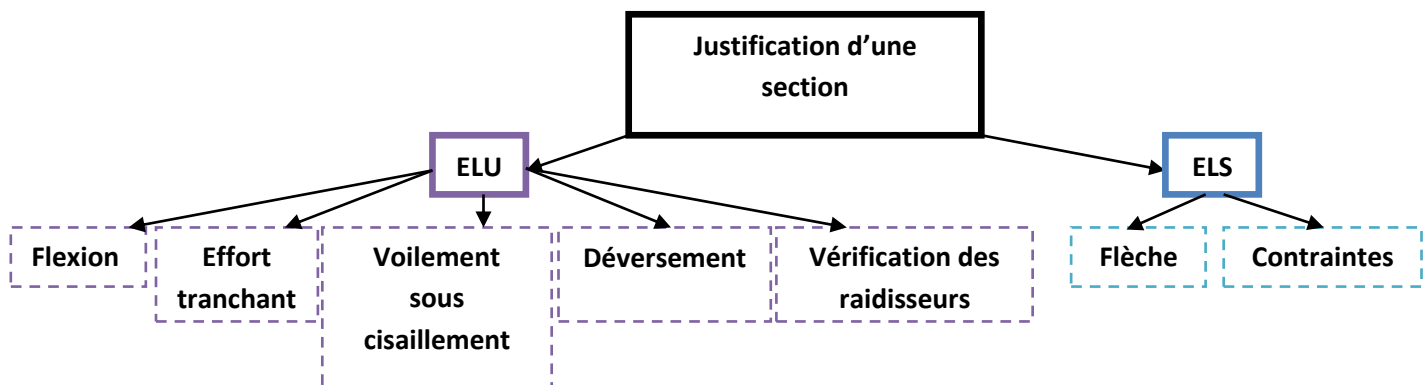
Une fois la conception générale de la structure réalisée, il faut la dimensionner (conception détaillée). Pour cela on doit vérifier : $\phi R > \gamma S$

C'est-à-dire, s'assurer que la résistance R est suffisante pour supporter les sollicitations S avec une fiabilité donnée.

Il faut aussi assurer la fonctionnalité durable (état limite d'utilisation) et la résistance à la fatigue de la structure. Il convient donc de déterminer les sollicitations qui sont les efforts internes (N , M , V , M_T), les contraintes, les déplacements, les réactions d'appuis et toutes les informations nécessaires pour le dimensionnement résultant de l'application des charges.

Cette partie détaillera les démarches de justification d'une section suivant les deux réglementations.

2.1. Démarche de justification d'une section selon Eurocode 3



Partie 2 – Figure 2.1 – 29 Démarche de justification d'une section selon CAN/CSA S6-06

Les sections appartenant aux deux premières classes peuvent à la fois être justifiées en plasticité et en élasticité. Les sections de classe 3 sont justifiées en élasticité et les sections de classe 4 peuvent aussi être justifiées en élasticité mais avec un calcul effectué sur une section efficace de manière à prendre en compte les risques de voilement.

2.1.1. Justification en flexion

Pour les sections appartenant aux deux premières classes, il suffit généralement de vérifier que le moment sollicitant à l'ELU reste inférieur au moment résistant plastique $M_{ed} \leq M_{pl,rd}$.

Pour les sections de classe 3 et les sections efficaces des sections de classe 4, il suffit de vérifier que le moment sollicitant à l'ELU reste inférieur au moment résistant élastique $M_{ed} \leq M_{el,rd}$.

Le moment résistant est donné par : $M_{cr,d} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}}$

2.1.2. Justification à l'effort tranchant

La justification d'une section métallique à l'effort tranchant est indépendante de la classe de la section. Ainsi, quelle que soit la classe de la section, on doit vérifier que $V_{ed} \leq V_{pl,rd}$ où $V_{pl,rd}$ est la résistance plastique à l'effort tranchant de la charpente métallique.

En l'absence de sollicitation de torsion, $V_{pl,rd}$ est donné par : $V_{pl,rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{Mo} \cdot \sqrt{3}}$

Avec A_v l'aire de la section reprenant le cisaillement.

2.1.3. Résistance au voilement sous cisaillement

Si l'âme est trop élancée, nous devons alors prendre en compte le fait qu'elle risque de voiler sous l'action de V_{ed} . Nous devons alors vérifier $V_{ed} \leq V_{b,rd}$.

$V_{b,rd}$ Représente la résistance au voilement par cisaillement tel que :

$$V_{b,rd} = V_{bw,rd} + V_{bf,rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}}$$

Avec :

η un paramètre relatif à la classe d'acier utilisé. Il est soumis au choix de l'annexe nationale de l'EN1993-1-5. Nous utilisons des aciers S355 pour lesquels $\eta=1.2$;

$V_{bf,rd}$ représente la contribution des semelles d'une poutre en I à la résistance au voilement sous cisaillement. ;

$V_{bw,rd}$ représente la contribution de l'âme à la résistance au voilement sous cisaillement.

2.1.4. Interaction flexion et effort tranchant

L'effort tranchant sollicitant à l'ELU diminue la résistance d'une section à la flexion lorsque ce dernier est supérieur à la moitié de l'effort tranchant résistant de la section considérée.

$$V_{ed} \leq 0.5 V_{rd}$$

L'effort tranchant résistant d'une section est calculé tel que. $V_{rd} = \min(V_{b,rd} ; V_{pl,rd})$.

La diminution à prendre en compte dépend de la classe de la section :

- Pour les sections en I appartenant aux deux premières classes de calculs, la limite d'élasticité de l'aire cisailée A_v est réduite pour le calcul du moment résistant plastique avant justification en flexion. Dans le calcul de $M_{pl,rd}$, on ne tient pas compte du décalage de l'ANP introduit par la modification des limites d'élasticité sur l'aire cisailée A_v .
- Pour les sections en I appartenant aux autres classes, un critère d'interaction est défini. Nous considérons deux cas :

Si $V_{ed} \leq 0.5 V_{pl,rd}$ => la résistance sous M_{ed} reste inchangée.

Si $V_{ed} > 0.5 V_{pl,rd}$ => f_{yw} est remplacé par $(1-\rho) \cdot f_{yw}$ pour le calcul du moment résistant.

Le calcul de $M_{pl,rd}$, sur une section comportant des éléments de classe 4, ne considère que les aires efficaces des semelles. Même si l'âme est de classe 4, on considère son aire brute. Néanmoins ce critère d'interaction n'est pas vérifié dans les sections situées à moins de $h_w/2$ d'un appui comportant un raidisseur vertical.

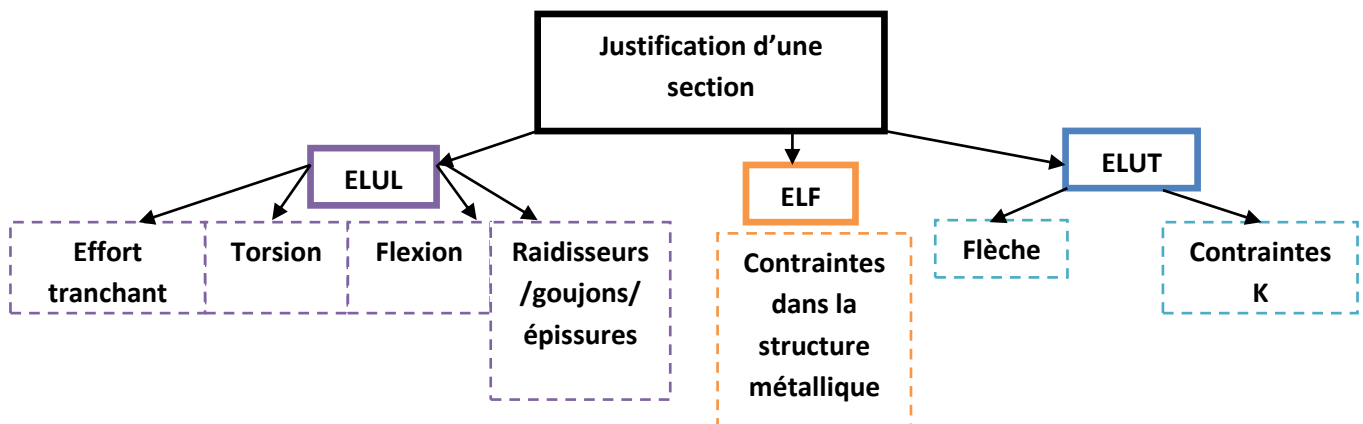
2.1.5. Vérification de la rigidité des raidisseurs

Pour les vérifications relatives à l'effort tranchant, nous devons nécessairement prendre en compte la présence des raidisseurs verticaux.

2.1.6. Vérification au déversement

De manière générale, les calculs au déversement consistent à calculer un coefficient de réduction de manière à pouvoir obtenir la résistance d'une section donnée sous un certain chargement. On utilisera une méthode qui consiste à vérifier la rigidité du portique formé par le platelage métallique et les deux poutres principales.

2.2. Démarche de justification d'une section selon CAN/CSA S6-06



Partie 2 – Figure 2.2— 30 Démarche de justification d'une section selon CAN/CSA S6-06

2.2.1. Etat limite ultime

Les résistances pondérées spécifiées dans le chapitre 10 doivent être égales ou supérieures à l'effet des charges pondérées spécifiées au chapitre 3 pour toutes les considérations pertinentes reliées à l'ÉLUL, notamment celles ayant trait à la résistance, à la rupture, à la flexion, au flambement, au flambement latéral en torsion, au glissement, au renversement et au soulèvement.

2.2.2. Vérification des contraintes ELF

L'étude de la fatigue se fait à partir de la vérification de l'équation $0.52 f_{sr} < F_{sr}$.

La capacité en fatigue est : $F_{sr} = \left(\frac{\gamma}{N_c} \right)^{1/5} \geq F_{srt}/2$

Avec :

γ constante de résistance à la fatigue applicable à la catégorie de détail, établie conformément à l'article 10.17.2.4 et indiquée dans la norme au tableau 10.4.

Nd nombre de cycles de contraintes de calcul à chaque passage du camion de calcul (voir le tableau 10.5 de la norme).

ADTT débit journalier moyen de camions par voie, selon les relevés de circulation du site. Au lieu d'utiliser ces données, on doit estimer ADTT, au moyen de l'expression p (ADTT), où p est égal à 1.0, 0.85 ou 0.80 pour les cas où il y a une, deux, trois ou plus de trois voies disponibles pour les camions, respectivement, et où ADTT a la valeur indiquée dans la norme au tableau 10.6.

Le rapport largeur-épaisseur h/w des âmes raidies transversalement ne doit pas être supérieur à $3150/\sqrt{F_y}$, à moins qu'un raidisseur longitudinal ait été prévu conformément à l'article 10.10.7.

Pour déterminer le rapport largeur-épaisseur, on peut remplacer F_y par la contrainte de compression maximale due aux charges pondérées à l'ÉLUL si le cisaillement maximal à l'ÉLF n'est pas supérieur à V_r , calculé conformément à l'article 10.10.5.1, avec $F_t=0$ et $\phi_s=1.0$.

L'écart admissible de cisaillement :

L'écart admissible de cisaillement à l'interface (N) d'un goujon Z_{sr} doit être :

$$Z_{sr} = (238 - 29.5 \log N_c) d^2 \geq 19 d^2$$

Avec :

N_c nombre de cycles, conformément à l'article 10.17.2.3 ;

d diamètre du goujon, mm ;

Les connecteurs de cisaillement doivent être calculés pour l'écart de cisaillement à l'interface q_{sr} suivant :

$$q_{sr} = 0.52 \frac{V_{sr} Q_s}{I_t n}$$

S'il n'y a pas de connecteur de cisaillement dans les zones de moment négatif, on doit prévoir un nombre N_a de connecteurs additionnels à chaque point d'inflexion, où

$$N_a = 0.52 \frac{A_r f_{sr}}{Z_{sr}}$$

Ces connecteurs additionnels doivent être placés sur une distance égale au tiers de la largeur effective de la dalle de chaque côté du point d'inflexion de la charge permanente.

2.2.3. Vérification de la flèche à l' ELUT

Pour l'ELUT, la flèche due à la surcharge majorée du coefficient de majoration dynamique ne doit pas dépasser :

Pour la plaque du tablier, 0.033 fois l'espacement des âmes des nervures et pour les nervures longitudinales et les entretoises transversales, 0.001 fois leur portées respectives.

De plus la flèche relative extrême entre les nervures adjacentes ne doit pas être supérieure à 2.5mm.

3. Analyse sismique

Norme CAN/CSA S6-06 :

Le calcul parasismique des différents éléments d'un ouvrage doit être conforme aux spécifications de la norme CAN/CSA S6-06. Pour le calcul relatif aux travées mobiles en position fermée, les charges sismiques à prendre en compte sont celles précisées aux chapitres 3 et 4 de la norme CAN/CSA S6-06. En position ouverte on prendra la moitié de ces valeurs pour le calcul. Une analyse préliminaire relative aux impacts des exigences parasismiques est recommandée afin d'en évaluer l'envergure dès le départ du projet. Dans certain cas, cette analyse pourrait amener le concepteur à privilégier un ouvrage avec un tablier plus léger (poutres en acier vs poutres en béton).

3.1. Catégorie d'importance

Aux fins des calculs parasismiques, les définitions suivantes s'appliquent pour établir la catégorie d'importance de l'ouvrage :

Pont de secours

Les ponts de secours font généralement partie de routes qui doivent demeurer ouvertes à toute circulation après le séisme de calcul. Généralement les ponts de secours sont ceux situés sur le réseau stratégique en soutien au commerce extérieur (RSSCE).

Pont d'urgence

Les ponts d'urgence font généralement partie des routes qui devraient à tout le moins être ouvertes aux véhicules d'urgence et aux fins de la sécurité et de la défense immédiatement après le séisme de calcul ou des ponts qui sont au-dessus des routes qui doivent demeurer ouvertes à toute circulation après le séisme de calcul. **Le pont 9 appartient à la catégorie Pont d'urgence.**

3.2. Pont à travée simple

Pour le calcul des culées la définition des ponts à travée simple il n'est pas requis de faire une analyse parasismique de celles-ci pour ces types de pont. De plus, pour ce type de pont seul les diaphragmes d'extrémité et les systèmes de retenue du tablier aux unités de fondation doivent faire l'objet d'une telle analyse en considérant les exigences de l'article 4.4.10.1 du code.

Partie 3

Synthèse des résultats

Cette partie établit et quantifie les différences entre les deux règlements appliqués à l'étude du pont levant en structure métallique. Une première section présente les différences générales. Une deuxième partie expose l'impact de celles-ci sur le dimensionnement. Une dernière section présente leur impact sur le coût.

La présente partie est structurée comme suit :

SOMMAIRE

1.	HYPOTHESES DE CALCULS.....	57
1.1.	ACIER.....	57
1.2.	CHARGES PERMANENTES.....	57
1.3.	ACTIONS DU TRAFIC ROUTIER	57
2.	LES ETATS LIMITES	60
3.	LES COMBINAISONS DE CHARGES.....	60
4.	METHODE DE DIMENSIONNEMENT	61
5.	VARIATION DE LA RESISTANCE PONDEREE SUIVANT LA NORME UTILISEE	62
6.	INFLUENCE DE LA NORME SUR LE COUT DE L'OUVRAGE.....	62

1. Hypothèses de calculs

1.1. Acier

	CAN/CSA S6-06 - chapitre 10	Eurocodes - Eurocode 3
Caractéristiques	Limite d'élasticité 350MPa Module d'élasticité 200 000 Mpa	Limite d'élasticité 355MPa Module d'élasticité 210 000 Mpa

1.2. Charges permanentes

	CAN/CSA S6-06 - chapitre 3	Eurocodes - Eurocode 1	Variation
Matériaux de construction	Valeur définie au chapitre 3 Tableau 3.3	Valeur moyenne définie par l'annexe A	-
Éléments produits en usine	+10% et -5%	Valeur nominale	-
Éléments non structuraux	+20% et -10%	Valeur nominale	-
Poids propre max.	4,6 kN/m ²	4,3 kN/m ²	+7%
Poids propre min.	3,7 kN/m ²	3,8 kN/m ²	+3%

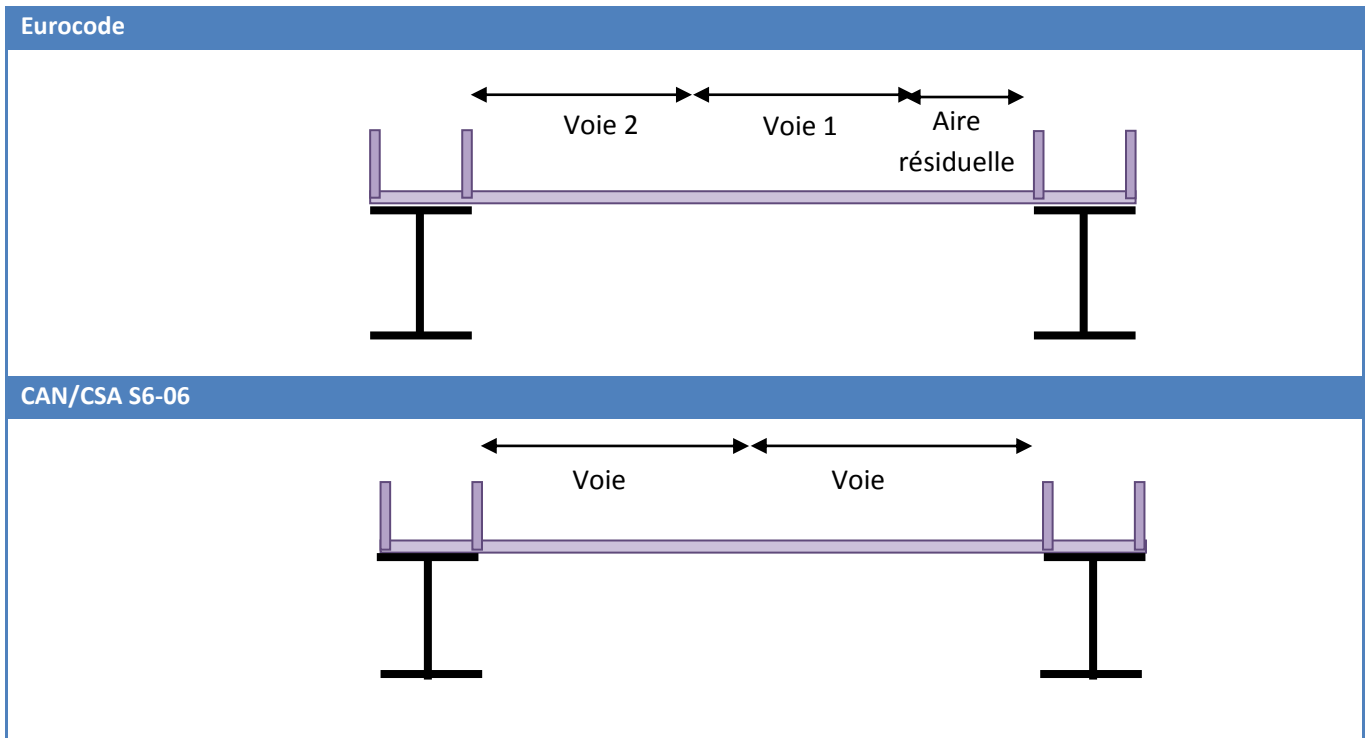
1.3. Actions du trafic routier

	CAN/CSA S6-06 - chapitre 3	Eurocodes - Eurocode 1	Variation
Nombre de voies	N déterminée avec le tableau 3.4; Largeur de la voie dépendant du nombre de voie; Pas d'aire résiduelle.	N=Partie entière(w/3); Largeur de voie imposée; Aire résiduelle dépendant de la largeur de la chaussée.	-
Modèle de charge	Surcharge de voie CL-625 (camion 5 essieux) dont la charge de chaque essieu est réduite à 80% superposée à une charge uniformément répartie de 9kN/m dont la largeur est de 3,0m.	Groupe 1a = LM1+ Charge de trottoir réduite; Groupe 1b = LM2 ; Groupe 2 = (0.75TS + 0.40UDL) + forces de freinage + forces transversales ; Groupe 3 = Charge de trottoir; Groupe 5 = LM3.	-

	CAN/CSA S6-06 - chapitre 3	Eurocodes - Eurocode 1	Variation
CMD	Fonction du nombre d'essieux sollicitant l'effort maximal. Ici CMD=1,25	Pour les véhicules spéciaux: $\delta=1+(0.7)/(1+0.2L)$; Pour les autres cas, δ est déjà inclus dans les valeurs. Ici $\delta=1,19$	+5%
Force de freinage	180kN plus 10% de la portion de surcharge de voie uniformément répartie d'une voie de calcul. Et < 700 kN.	Pour les calculs de charge normaux: Dépend de l'intensité de la charge LM1; Bornée à $180 \alpha q_1 \leq Q_1 k \leq 900$ kN.	+79%
Charge sur les trottoirs	$1.6 \text{ kPa} \leq P = 5.0 - \frac{s}{30} \leq 4.0 \text{ kPa}$	Charge de trottoir uniformément répartie à $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$.	-56%

Nombre de voies :

Les largeurs de voies aux Eurocodes sont imposées à 3m ce qui induit une aire résiduelle de largeur variable. Aux normes canadiennes les largeurs ne sont pas imposées mais la charge uniformément répartie superposée au camion CL-625 est d'une largeur de 3m.



Modèle de charge :

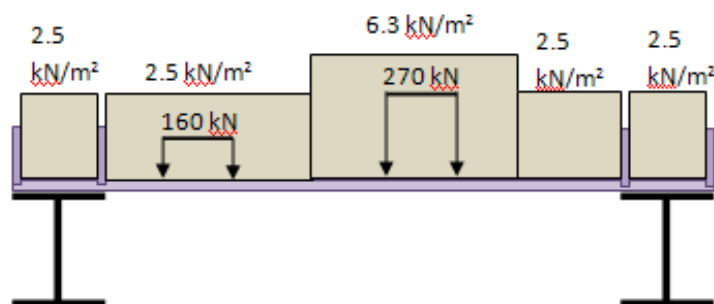
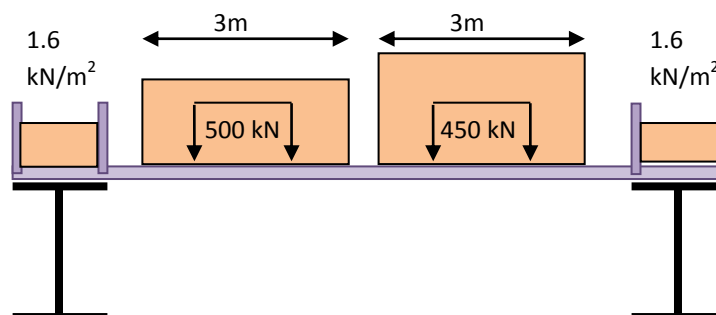
Le tableau ci-dessus illustre la comparaison entre le modèle de charge LM1 (EC), le modèle utilisé aux états limites ultimes (CAN/CSA S6-06) et le modèle utilisé aux états limites ultimes (CAN/CSA S6-06).

➤ **EUROCODES**

LM1+ Charge de trottoir réduite.

➤ **CANC/CSA S6-06**

Surcharge de voie CL-625 dont la charge de chaque essieu est réduite à 80% superposée à une charge uniformément répartie de 9 kN/m + trottoir. Pour les ÉLUT (flèche) et ÉLF (fatigue) la surcharge routière utilisée correspond à la surcharge de camion placée au centre d'une seule voie de calcul (pas de surcharge de voie).

EUROCODES**LM1+ Charge de trottoir réduite****CANC/CSA S6-06****ELUL**

2. Les états limites

	CAN/CSA S6-06 - chapitre 10	Eurocodes - Eurocode 3
Etats limites	ELUL= Etat limite d'ultime ELUT= Etat limite d'utilisation ELF= Etat limite de fatigue	ELS= Etat limite de service ELU = Etat limite ultime

On peut effectuer un parallèle entre :

- Les ELU et les ELUL
- Les ELS et les ELUT et ELF

3. Les combinaisons de charges

➤ Eurocodes

ELU :

Combinaisons fondamentales : $\Sigma \gamma_G G_k + \gamma_P P_k + \gamma_Q Q_{k1} + \Sigma \gamma_Q \psi_0 Q_k$

$$1,35 G_{sup} + 1,00 G_{inf} + 1,00 P + 1,35 \text{ gri} \\ 1,50 T_k + TS + 0,54 UDL$$

Combinaisons accidentelles : $\Sigma \gamma_G G_k + \gamma_P P_k + \gamma_Q Q_{k1} + \Sigma \gamma_Q \psi_0 Q_k$

$$1,00 G_{sup} + 1,00 G_{inf} + 1,00 P + 1,00 F_A + 0,75 TS + 0,4 UDL$$

Combinaisons sismiques : $\Sigma G_k + P_k + \gamma_Q Q_{k1} + \gamma_I A_{Ed} + \Sigma \psi_2 Q_k$

ELS :

Combinaisons quasi-permanentes : $G_k + P_k + \Sigma \psi_2 Q_k$

$$G_k + P_k + 0,5 T_k$$

Combinaisons fréquentes : $G_k + P_k + \psi_1 Q_{k1} + \Sigma \psi_2 Q_k$

$$G_k + P_k + 0,75 TS + 0,4 UDL + 0,5 T_k \\ 0,6 T_k$$

Combinaisons non-fréquentes : $G_k + P_k + \psi_1' Q_{k1} + \Sigma \psi_1 Q_k$

$$G_k + P_k + 0,8 \text{ gr1} + 0,6 T_k \\ 0,8 T_k + 0,75 TS + 0,4 UDL$$

Combinaisons caractéristiques : $G_k + P_k + Q_{k1} + \Sigma \psi_0 Q_k$

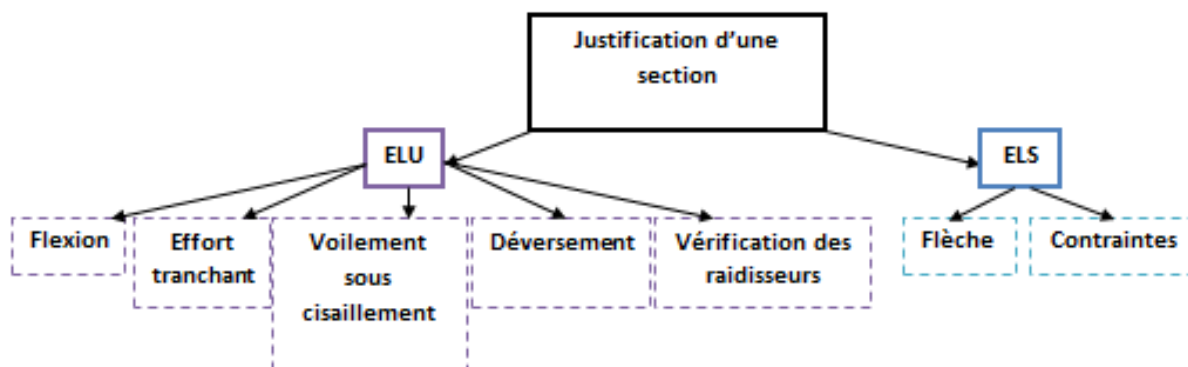
➤ **CAN/CSA S6-06**

12 combinaisons de charges sont Prévues par le CAN/CSA (Tableau 3.1 CAN/CSA S6-06)

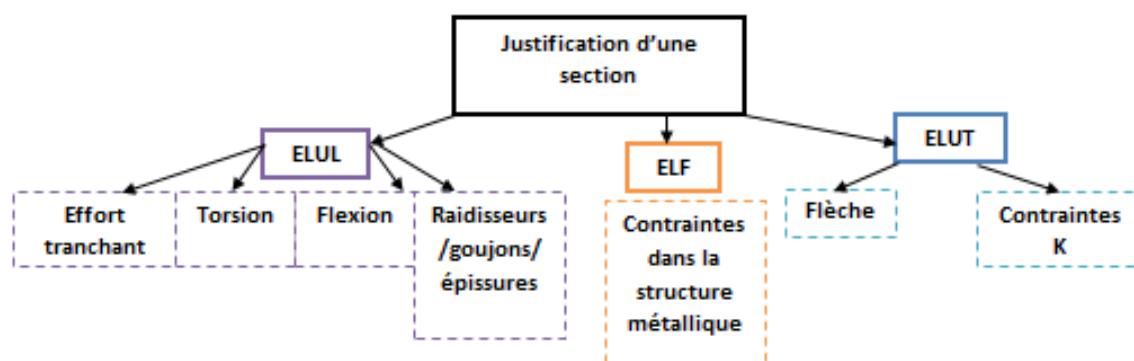
Charges	Charges permanentes			Charges transitoires					Charges exceptionnelles			
	D	E	P	L*	K	W	V	S	EQ	F	A	H
État limite de fatigue												
Combinaison ÉLF n° 1	1,00	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
États limites d'utilisation												
Combinaison ÉLUT n° 1	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	0	0	1,00	0	0	0	0
Combinaison ÉLUT n° 2†	0	0	0	0,90	0	0	0	0	0	0	0	0
États limites ultimes‡												
Combinaison ÉLUL n° 1	α_D	α_E	α_F	1,70	0	0	0	0	0	0	0	0
Combinaison ÉLUL n° 2	α_D	α_E	α_F	1,60	1,15	0	0	0	0	0	0	0
Combinaison ÉLUL n° 3	α_D	α_E	α_F	1,40	1,00	0,50§	0,50	0	0	0	0	0
Combinaison ÉLUL n° 4	α_D	α_E	α_F	0	1,25	1,65§	0	0	0	0	0	0
Combinaison ÉLUL n° 5	α_D	α_E	α_F	0	0	0	0	0	1,00	0	0	0
Combinaison ÉLUL n° 6**	α_D	α_E	α_F	0	0	0	0	0	0	1,30	0	0
Combinaison ÉLUL n° 7	α_D	α_E	α_F	0	0	0,90§	0	0	0	0	1,30	0
Combinaison ÉLUL n° 8	α_D	α_E	α_F	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00
Combinaison ÉLUL n° 9	1,35	α_E	α_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. Méthode de dimensionnement

EUROCODES



CAN/CSA S6-06



5. Variation de la résistance pondérée suivant la norme utilisée

	CANC/CSA S6-06	Eurocodes	Variations
Flexion	$Mr = \phi_s \times Z_x \times F_y$ $Mr = 332.5 \times F_y$	$M_{c,rd} = \frac{W_{eff} \times f_y}{\gamma_{Mo}}$ $M_{c,rd} = 355 \times F_y$	- 6%
Cisaillement	$V_r = \phi_s \times A_w \times F_s$ $V_{pl,rd} = 181.75 \times F_s$	$V_{pl,rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{Mo} \sqrt{3}}$ $V_{pl,rd} = 204.96 \times A_v$	- 12.77%

Le tableau ci-dessus met en évidence que la norme canadienne est plus contraignante que la norme européennes.

6. Influence de la norme sur le coût de l'ouvrage

Afin de déterminer l'influence de la norme sur le coût globale de l'ouvrage les estimations ont d'abord été effectuées avec des prix utilisés en Europe pour le dimensionnement aux Eurocodes et des prix canadiens pour le dimensionnement selon la CAN/CSA S6-06. Cependant, il apparaissait clairement que les prix n'étaient pas comparables. D'une part par la différence des devises - €/€ - d'autre part par le coût de la main d'œuvre. En effet, le taux horaire au Québec est plus élevé qu'en France. Ces deux raisons rendant la comparaison difficilement réalisable, la solution de comparer avec les prix canadiens paraissait être une bonne alternative.

Les prix canadiens utilisés par l'entreprise GENIVAR et utilisé dans cette étude sont donnés par le Ministère des Transports du Québec. Cependant les coûts des éléments métalliques réalisés en usine ont été donnés forfaitairement par l'entreprise, ce qui ne permet pas de comparer avec les éléments dimensionnés aux Eurocodes.

Suite aux difficultés exposées ci-dessus, aucune comparaison de prix n'a pu être établie. L'estimation réalisée à l'aide des prix du MTQ et de l'entrepreneur est en Annexe 05.

Conclusion générale

L'étude effectuée pour le bureau d'étude québécois GENIVAR a mis en exergue les différences entre l'Eurocode 3 et la norme CAN/CSA S6-06.

L'approche de l'Eurocode 3 est la plus complexe des deux : chaque comportement pouvant affecter une barre est clairement défini et plusieurs méthodes sont parfois disponibles pour leur vérification. L'Eurocode 3 permet d'optimiser une structure : l'implantation de chaque facteur peut-être contrôlé et évite le surdimensionnement de l'ouvrage. À l'opposé, de nombreuses spécifications de la norme CAN/CSA S6-06 sont établies par des méthodes simplifiées et, de ce fait, doivent être utilisées avec beaucoup de rigueur par l'ingénieur qui doit veiller aux limites de celles-ci. Le manuel de conception des structures est un ouvrage du Ministère des Transports Québécois. C'est un outil destiné à dimensionner rapidement les cas les plus fréquemment rencontrés dans le domaine des Ouvrages d'art. Il donne de nombreux commentaires, spécifications et exemples concrets d'application de la norme. Ceci permet de faciliter l'utilisation de la norme CAN/CSA S6-06.

Au regard des résultats obtenus sur le dimensionnement de la structure métallique du Pont 9, les sollicitations sont plus importantes selon le règlement canadien. Ceci est expliqué par des facteurs climatiques et culturels. En effet, le climat hivernal du Québec impose des charges de neige bien supérieures aux charges prévues en Europe. De plus, les cycles de gel/dégel sont la première cause de dégradation des structures au Canada. Les deltas thermiques calculés par la CAN/CSA S6-06 ne sont pas habituels en Europe. Les véhicules étant globalement plus grands et les transports de marchandises plus lourds en Amérique du Nord, il est normal que les charges dues au trafic routier soient plus importantes.

Pour conclure, bien que l'écriture des spécifications de l'Eurocodes 3 et de la norme CAN/CSA S6-06 partage une philosophie commune, la CAN/CSA S6-06 est plus contraignante et ne permet pas toujours d'optimiser la structure tandis que l'Eurocodes 3 permet une approche plus détaillée et plus précise de chaque élément de la structure. Il faut cependant souligner que la possibilité d'utilisation des méthodes simplifiées proposées par la norme canadienne permet une économie sur le plan du temps d'étude.

Bibliographie

[1] Construction d'un pont levant sur le canal de Chambly, texte de l'exposé présenté lors du congrès de l'Association des transports du Canada à Halifax (Nouvelle-Écosse), juillet 2010.

- CAN/CSA S6-06

[2] CAN/CSA S6-06 Chapitre 1 : Généralités. Novembre 2006.

[3] CAN/CSA S6-06 Chapitre 3: Charges. Novembre 2006.

[4] CAN/CSA S6-06 Chapitre 4 : Calcul Parasismique. Novembre 2006.

[5] CAN/CSA S6-06 Chapitre 5 : Méthodes d'analyse. Novembre 2006.

[6] CAN/CSA S6-06 Chapitre 10 : Ouvrage en acier. Novembre 2006.

[7] CAN/CSA S6-06 Chapitre 12 : Dispositifs de retenue et supports d'équipements routiers. Novembre 2006.

[8] CAN/CSA S6-06 Chapitre 13 : Ponts mobiles. Novembre 2006.

- MTQ

[9] MTQ. Calcul des ouvrages d'art – TOME III.

[10] MTQ. Manuel de conception des structures. Volume 1. Octobre 2009.

- Eurocode 0

[11] NF EN 1990 mars 2003 : Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures (P06101). Homologué depuis le 20 mars 2003.

[12] NF P06100-2 juin 2004. Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures. Partie 2 : annexe nationale à l'EN 1990 : 2002. Homologué depuis le 5 juin 2004.

[13] NF EN 1990/A1 juillet 2006 : Eurocod. Bases de calcul des structures (P06100-1/A1).

- Eurocode 1

[14] NF EN 1991-1-1 mars 2003 : Eurocode 1. Actions sur les structures. Partie 1.1 : actions générales. Poids volumiques, poids propres. Homologué depuis le 20 mars 2003.

[15] NF P06111-2 juin 2004. Eurocodes. Bases de calcul des structures. Partie 2 : annexe nationale à l'EN 1991-1-1 (P06111-2). Homologué depuis le 5 juin 2004.

[16] NF EN 1991-1-2 juillet 2003. Eurocode 1. Actions sur les structures. Partie 1.3 : actions générales. Charges de neige (P06113-1). Homologué depuis le 5 avril 2004.

[17] NF EN 1991-1-3 : 2004 annexe nationale (PR NF EN 1991-1-3/NA octobre 2006) : Eurocode 1 : Actions sur les structures. Partie 1.3 : actions générales. Charges de neige. Action générales. Charges de neige (P06113-1/NAPR).

[18] NF EN 1991-1-4 nov.2005 : Eurocode 1. Actions sur les structures. Partie 1.4 : actions générales. Actions du vent (P06114-1). Homologué depuis le 5 nov. 2005.

[19] NF EN 1991-1-5 mai 2004 : Eurocode 1. Actions sur les structures. Partie 1.5 : actions générales. Actions thermiques. Homologué depuis le 5 mai 2004.

[20] NF EN 1991-1-6 nov. 2005 : Eurocode 1. Actions sur les structures. Partie 1.6 : actions générales. Actions en cours d'exécution. Homologué depuis le 20 nov. 2005.

- Eurocode 3

[21] NF EN 1993-1-1 oct. 2005 Eurocode 3. Calcul des structures en acier. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.

[22] XP ENV 1993-2 dec. 2000. Eurocode 3 : calcul des structures en acier et document d'Application Nationale. Partie 2 : ponts métalliques.

- Eurocode 8

[23] NF EN 1998-1 sept. 2005 : Eurocode 8 : calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles générales pour les bâtiments (P06030-1). Homologué depuis le 5 septembre 2005.

[24] NF EN 1998-3 dec. 2005 : Eurocode 8 : calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 2 : évaluation et renforcement des ponts (P06033-1). Homologué depuis le 31 décembre 2005.

[25] NF EN 1998-5 sept. 2005 : Eurocode 8 : calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques (P06035-1). Homologué depuis le 20 septembre 2005.

- Règles de calcul et de conception

[26] CNRC, Code national du bâtiment du Canada, 2005.

[27] NF P 06-004 – Bases de calcul des constructions – Charges permanentes et charges d'exploitations dues aux forces de pesanteur.

[28] NF P EN 10020 – Définition et classe des nuances d'acier.

Table des figures

Partie 1 – Figure 2.1	— 1	Palais des Congrès de Montréal, Québec.	13
Partie 1 – Figure 2.1	— 2	Revitalisation du front de mer, Port-d’Espagne, Trinité-et-Tobago.	13
Partie 1 – Figure 2.1	— 3	Innovation Place, Saskatoon, Saskatchewan.	13
Partie 1 – Figure 2.2	— 4	Organigramme - Transport, Division Montérégie.....	14
Partie 1 – Figure 3.1.1	— 5	Situation géographique générale.....	15
Partie 1 – Figure 3.1.1	— 6	Localisation du nouveau pont.....	15
Partie 1 – Figure 3.1.2	— 7	Vue d’ensemble de l’ancien Pont 9 sur le canal de Chambly	16
Partie 1 – Figure 3.1.2	— 8	Vue de la voie carrossable du Pont 9 existant	16
Partie 1 – Figure 3.1.3	— 9	Signes de dégradations sur l'ancien Pont 9	17
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 10	Différents types de ponts levants	19
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 11	Descriptif du nouveau pont n° 9	20
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 12	Agencement du mur combiné	21
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 13	Tablier ajouré et caillebotis.....	21
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 14	Elévation garde-corps sur chasse-roue	22
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 15	Positionnement des tirants.....	22
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 16	Vue en élévation du nouveau pont no 9.....	23
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 17	Positionnement du pont suivant les différents angles de levages	23
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 18	Schéma des points de mouvements du pont.....	24
Partie 1 – Figure 3.2.2	— 19	Position optimale des centres de gravité.....	25
Partie 1 – Figure 3.2.3	— 20	Alignement des palplanches et pieux caissons	26
Partie 1 – Figure 3.2.3	— 21	Tablier ajouré fabriqué en usine	26
Partie 1 – Figure 3.2.3	— 22	Cadre en A et bras supérieur fabriqués en usine.....	27
Partie 1 – Figure 3.2.4	— 23	Tablier levé à 80 degrés	29
Partie 1 – Figure 3.3	— 24	Organigramme du projet	30
Partie 1 – Figure 4.5	— 25	Planning.....	38
Partie 1 – Figure 5	— 26	Schéma euristique.....	39
Partie 1 – Figure 5	— 27	Démarche suivie.....	40
Partie 2 – Figure 1.3.2	— 28	Charges des essieux du camion CL-625.....	46
Partie 2 – Figure 2.1	— 29	Démarche de justification d'une section selon CAN/CSA S6-06	49
Partie 2 – Figure 2.2	— 30	Démarche de justification d'une section selon CAN/CSA S6-06	51

Table des tableaux

Partie 1 – Tableau 4.2.3— 1 Concordance des normes	34
Partie 2 – Tableau 1.1 — 2 Nuance de l'acier suivant les normes Canadienne.....	44
Partie 2 – Tableau 1.3 — 3 Choix du CMD à appliquer en fonction de la portée de l'ouvrage	47
Partie 2 – Tableau 1.6 — 4 Type d'ossature	48

Tables des Annexes

ANNEXE – 01 – RAPPORT DE FORAGE

ANNEXE – 02 – AGENCEMENT GÉNÉRAL DES FONDATIONS

ANNEXE – 03 – PLAN D'ENSEMBLE

ANNEXE – 04 – VUE ISOMETRIQUE

ANNEXE – 05– ESTIMATION DU PRIX DE L'OUVRAGE

NDC – 01 – NOTE DE CALCUL COMMUNES AUX DEUX NORMES

NDC – 02 – NOTE DE CALCUL AUX NORMES CANADIENNES

NDC – 03 – NOTE DE CALCUL AUX EUROCODES